

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## FAKULTA STROJNÍ

Studijní program N 2301 – Strojní inženýrství

Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

### **Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS**

### **Determination of stress-strain curves by means of the optical system ARAMIS**

**Bc. Lukáš Horák**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph. D. - *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph. D. - *TU v Liberci*

#### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 74

Počet obrázků: 59

Počet tabulek: 18

Počet příloh: 12

Počet jiných příloh: 1 CD

**Datum:** 27. května 2011



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

Katedra strojírenské technologie

Studijní rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Bc. Lukáš H O R Á K</b>
Studijní program	<b>N 2301 Strojní inženýrství</b>
Studijní obor	<b>2303T002 Strojírenská technologie</b>
Zaměření	<b>Tváření kovů a plastů</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s problematikou plastické deformace materiálů a popsání materiálů používaných v automobilovém průmyslu.
2. Hodnocení plastických vlastností plechů pomocí statické zkoušky tahem.
3. Základy fotogrammetrie a její použití při bezkontaktním optickém měření deformace.
4. Pomocí bezkontaktních optických metod experimentální určení hodnot skutečného napětí  $\sigma$  a skutečného přetvoření  $\phi$  hlubokotažného a vysokopevnostního materiálu v oblasti od jejich meze pevnosti do okamžiku porušení daných materiálů.
5. Vyhodnocení a srovnání naměřených dat pomocí navržené metodiky hodnocení.
6. Závěr.

# ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: N 2301 – Strojní inženýrství

Student: Bc. Lukáš Horák

Téma práce: Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS

Determination of stress-strain curves by means of the optical system ARAMIS

Číslo DP:

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph. D. - *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph. D. - *TU v Liberci*

## **Abstrakt:**

Tato diplomová práce je zaměřena na zjišťování skutečných napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\varphi$  v ocelích za mezí pevnosti pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS. V teoretické části diplomové práce je popsána zejména problematika sortimentu plechů používaných v automobilovém průmyslu a základy fotogrammetrie. V experimentální části je popsána metodika zjišťování skutečných napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\varphi$  v oblastech za mezí pevnosti testovaných materiálů. Hlavním přínosem této diplomové práce je budoucí možnost ověření vlivu zadávání aproximovaných a reálných hodnot skutečných napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\varphi$  za mezí pevnosti do numerických simulací tvářecích procesů.

## **Abstract:**

This thesis is focused on determination of the true stress  $\sigma$  and true strain  $\varphi$  for steels in the area over ultimate strength by means of the optical contact-less system ARAMIS. In theoretical part of thesis is described mainly topic about sheets using in automotive industry and basics of photogrammetry. In experimental part is given methodology for determination of true stress  $\sigma$  and true strain  $\varphi$  in the area over ultimate strength of tested materials. The main benefit of this thesis is future possibility to validate influence of input data (real and regressed values of true stress  $\sigma$  and true strain  $\varphi$  into numerical simulations of forming process.

### **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 27. května 2011

.....

Bc. Lukáš Horák

Tutleky 33

517 41 Kostelec nad Orlicí

## **Poděkování**

Velice rád bych poděkoval zejména vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D. za jeho profesionální a odborný dohled po celou dobu tvorby této diplomové práce. Zároveň děkuji za rady v části teoretické i experimentální a za pomoc při doplňování odborných znalostí. Velký dík patří i panu Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D., který mi velice pomohl jak při tvorbě teoretické části diplomové práce, tak při experimentu.

Dále děkuji všem členům Katedry strojírenské technologie - oddělení tváření kovů a plastů TUL, kteří se mi po celé moje studium velmi pečlivě věnovali a neváhali mi pomoci s každým problémem. Děkuji také všem ostatním zaměstnancům TUL, se kterými jsem se po dobu svého studia setkal.

V neposlední řadě patří největší poděkování mým rodičům, kteří umožnili a podpořili mé studium na Technické univerzitě v Liberci a bez kterých by to nešlo. Dále všem rodinným příslušníkům, přítelkyni, kamarádům, známým a všem, kteří měli pozitivní vliv na mé studium.

Děkuji všem!

Bc. Lukáš Horák



## Obsah

<b>Seznam zkratk a symbolů .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Deformační chování materiálů.....</b>	<b>11</b>
2.1 Krystalografická struktura kovů .....	11
2.1.1 Poruchy krystalových mřížek .....	12
2.2 Elastická deformace.....	12
2.3 Plastická deformace.....	13
<b>3 Sortiment plechů používaných v automobilovém průmyslu .....</b>	<b>14</b>
3.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem.....	14
3.2 IF (Interstitials Free) oceli.....	15
3.3 Oceli s BH efektem .....	15
3.3.1 Oceli se zvýšeným obsahem titanu resp. niobu .....	15
3.3.2 Oceli se zvýšeným obsahem uhlíku .....	15
3.4 Vysokopevnostní materiály .....	16
3.4.1 DP (Dual Phase) oceli.....	16
3.4.2 TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli .....	16
3.4.3 CP (Complex Phase) oceli.....	17
3.4.4 Martenzitické (MS) oceli.....	18
3.5 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli.....	18
<b>4 Statická zkouška tahem .....</b>	<b>20</b>
4.1 Hlavní a vedlejší ukazatele zkoušky tahem.....	21
4.1.1 Hlavní ukazatele zkoušky tahem.....	21
4.1.2 Vedlejší ukazatele zkoušky tahem .....	23
4.2 Smluvní a skutečný tahový diagram.....	24
4.2.1 Přepočítání mezi smluvním a skutečným tahovým diagramem .....	26
4.3 Aproximace zkoušky tahem .....	28
<b>5 Bezkontaktní optické systémy – fotogrammetrie.....</b>	<b>30</b>
5.1 Princip metod fotogrammetrie .....	31
5.2 Měření deformace optickými systémy firmy GOM .....	32
5.2.1 Měřicí systém ARAMIS .....	33
5.2.2 Měřicí systém ARGUS.....	35
5.2.3 Měřicí systém PONTOS.....	36



<b>6</b>	<b>Experimentální část diplomové práce.....</b>	<b>37</b>
6.1	Cíle diplomové práce .....	37
<b>7</b>	<b>Materiály použité pro měření .....</b>	<b>38</b>
7.1	Materiál DX 54 .....	39
7.2	Materiál RA-K 40/70.....	40
7.3	Materiál CP-W 800.....	41
7.4	Materiál LITEC RAGAL 1000 .....	42
<b>8</b>	<b>Měření skutečných hodnot <math>\sigma</math> - <math>\varphi</math> v oblasti za mezí pevnosti .....</b>	<b>43</b>
8.1	Nanesení deformační sítě na měřené vzorky .....	44
8.2	Měření statické zkoušky tahem optickým systémem ARAMIS.....	45
8.3	Vyhodnocení zkoušky tahem měřícím systémem ARAMIS .....	46
8.4	Výpočet skutečného napětí ( $\sigma$ ) a přetvoření ( $\varphi$ ) za mezí pevnosti.....	48
8.4.1	Výpočet okamžité šířky vzorku b.....	49
8.4.2	Výpočet okamžité tloušťky vzorku t.....	50
<b>9</b>	<b>Výsledky měření a výpočtů.....</b>	<b>52</b>
9.1	Výsledky měření – materiál DX 54 .....	52
9.1.1	Materiál DX 54 (směr odebrání 0°).....	53
9.1.2	Materiál DX 54 (směr odebrání 45°).....	57
9.1.3	Materiál DX 54 (směr odebrání 90°).....	59
9.2	Materiál RA-K 40/70.....	62
9.3	Materiál CP-W 800.....	65
9.4	Materiál LITEC RAGAL 1000 .....	67
<b>10</b>	<b>Diskuze výsledků .....</b>	<b>69</b>
<b>11</b>	<b>Doporučení pro další výzkum.....</b>	<b>70</b>
<b>12</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>71</b>
<b>13</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>72</b>
<b>14</b>	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>74</b>



## Seznam zkratk a symbolů

ZKRATKA NEBO SYMBOL	JEDNOTKY	VÝZNAM
A	[%]	tažnost
A <sub>80mm</sub>	[%]	tažnost materiálu
Ag	[ - ]	stříbro
Al	[ - ]	hliník
Au	[ - ]	zlato
A <sub>x</sub>	[%]	tažnost ve směru
b	[mm]	šířka vzorku
b <sub>0</sub>	[mm]	počáteční šířka vzorku
BCC	[ - ]	body - centered - cubic
Be	[ - ]	beryllium
BH	[ - ]	bake hardened steel
c	[s <sup>-1</sup> ]	deformační rychlost
C	[MPa]	modul monotónního zpevnění
C	[ - ]	uhlík
CAD	[ - ]	Computer Aided Design
Co	[ - ]	Kobalt
Cu	[ - ]	měď
CP	[ - ]	complex phase
CQ	[ - ]	comercial quality (plechy běžné kvality)
Cr	[ - ]	chrom
DP	[ - ]	dual phase
DQ	[ - ]	drawing quality (tažné plechy)
DDQ	[ - ]	deep drawing quality (klubokotažné plechy)
dL	[mm]	přírůstek délky
dφ	[ - ]	přírůstek napětí
e	[ - ]	základ přirozeného logaritmu
E	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
EDDQ	[ - ]	extra deep drawing quality (zvlášť hlubokotažné plechy)
EDDQ - S	[ - ]	extra deep drawing qualita - super (super hlubokotažné plechy)
FCC	[ - ]	face - centered - cubic
F	[N]	zatěžující osová síla
F <sub>e</sub>	[N]	síla odpovídající výrazné mezi kluzu
F <sub>eα</sub>	[ - ]	železo alfa
F <sub>eγ</sub>	[ - ]	železo gama
F <sub>p0,2</sub>	[N]	síla odpovídající trvalé absolutní deformaci 0,2%
F <sub>max</sub>	[N]	maximální naměřená síla
G	[MPa]	modul pružnosti v tahu
H	[ - ]	vodík
HCP	[ - ]	hexagonal - close - packed
IF	[ - ]	interstitials free steels
k	[ - ]	koeficient zaplnění plochy
KUT	[ - ]	komplexní ukazatel hlubokotažnosti
L	[mm]	konečná délka
L <sub>0</sub>	[mm]	počáteční délka





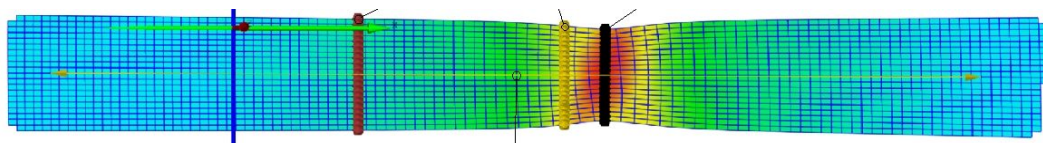
<b><math>L_u</math></b>	[mm]	délka po přetržení vzorku
<b>Mg</b>	[-]	hořčík
<b>Mn</b>	[-]	mangan
<b>n</b>	[-]	exponent deformačního zpevnění
<b>N</b>	[-]	dusík
<b>Ni</b>	[-]	Nikl
<b>P</b>	[-]	fosfor
<b>Pt</b>	[-]	Platina
<b>R</b>	[MPa]	smluvní hodnota napětí
<b><math>R_e</math></b>	[MPa]	mez kluzu
<b><math>R_{eH}</math></b>	[MPa]	horní mez kluzu
<b><math>R_{eL}</math></b>	[MPa]	dolní mez kluzu
<b><math>R_m</math></b>	[MPa]	mez pevnosti
<b><math>R_{p0,2}</math></b>	[MPa]	smluvní mez kluzu
<b><math>r_\alpha</math></b>	[-]	normálová anizotropie
<b>S</b>	[mm <sup>2</sup> ]	původní průřez
<b>Si</b>	[-]	křemík
<b><math>S_u</math></b>	[mm <sup>2</sup> ]	síla působící na jednotku skluzové roviny
<b>t</b>	[mm]	tloušťka vzorku
<b>T</b>	[K]	teplota
<b><math>t_0</math></b>	[mm]	původní tloušťka vzorku
<b>TRIP</b>	[ - ]	transformation induced plasticity
<b>TWIP</b>	[ - ]	twiping indukted plasticity
<b>UH</b>	[ - ]	ukazatel hlubokotažnosti
<b>v</b>	[mm/min]	rychlost zatěžování
<b>V</b>	[-]	vanad
<b>V</b>	[mm <sup>3</sup> ]	okamžitý objem
<b><math>V_0</math></b>	[mm <sup>3</sup> ]	původní objem
<b>W</b>	[-]	wolfram
<b>Z</b>	[%]	kontrakce
<b>Zn</b>	[-]	zinek
<b>ZP</b>	[MPa]	zásoba plasticity
<b><math>\gamma</math></b>	[-]	skos
<b><math>\Delta L</math></b>	[mm]	prodloužení zkušební tyčky
<b><math>\Delta t</math></b>	[mm]	změna tloušťky
<b><math>\sigma</math></b>	[MPa]	napětí
<b><math>\sigma_{apx}</math></b>	[MPa]	aproximované hodnoty napětí
<b><math>\sigma_k</math></b>	[MPa]	napětí na mezi kluzu
<b><math>\varepsilon</math></b>	[-]	poměrné prodloužení
<b><math>\varepsilon_u</math></b>	[-]	maximální poměrné prodloužení
<b><math>\Phi</math></b>	[-]	přetvoření
<b><math>\Phi_1</math></b>	[-]	hlavní přetvoření
<b><math>\Phi_2</math></b>	[-]	vedlejší přetvoření
<b><math>\Phi_3</math></b>	[-]	vedlejší přetvoření ve směru tloušťky
<b><math>\tau</math></b>	[MPa]	smykové napětí

## 1 Úvod

Technologie tváření kovů patří mezi základní výrobní operace ve strojírenském průmyslu. A nejde jen o tváření kovů, ale i ostatních materiálů používaných ve strojírenské výrobě. Obecně lze technologie tváření dělit na objemové a plošné, v této práci se však budeme zabírat pouze plošným tvářením kovových materiálů (plechů), zejména ve spojitosti s jejich použitím v automobilové výrobě a numerických simulacích.

S rychlým vývojem nových materiálů a technologií jsou kladeny stále vyšší požadavky na mechanické vlastnosti a tvářitelnost materiálů. Kromě vysokých nároků a specifikací na nově vyvíjené materiály je požadována také vysoká jakost tvářených dílů. Abychom získali tvářený díl s vysokou jakostí bez vad je nutná dokonalá předvýrobní fáze pro každý tvářený díl a v dnešní době také velmi důležitá numerická simulace celého tvářecího procesu. Numerická simulace tvářecího procesu probíhá nejen v předvýrobní fázi, ale i ve výrobní fázi. K provedení těchto simulací je nezbytné zjistit charakteristické vlastnosti materiálů.

Ke zjišťování charakteristických vlastností (především mechanických vlastností) materiálu slouží technologické zkoušky, z nichž hlavní je statická zkouška tahem, která je definována příslušnou normou (EN-ISO 6892-1). S novými technologiemi tváření se vyvíjejí také nové technologie měření a vyhodnocování deformačního chování. Trendem poslední doby je využití bezkontaktních optických měřících systémů založených na principu fotogrammetrie. Tyto systémy umožňují přesné měření všech veličin celého tvářecího procesu. Jeden z těchto optických měřících systémů (systém „ARAMIS“ od německé firmy GOM) byl využit pro měření v experimentální části této diplomové práce. Výhody těchto měřících systémů jsou zejména ve flexibilitě vyhodnocování jednotlivých měření, rychlosti vyhodnocování, jednoduchém porovnání různých měření a zejména vysoké přesnosti naměřených hodnot. Z hlediska dalšího vývoje tváření jsou optické měřící systémy nepostradatelnou součástí a to nejen pro měření deformací, ale také pro vyšetřování kinematických veličin. Cílem této práce je zjištění skutečných hodnot přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  u vybraných ocelí v oblasti za mezí pevnosti.



**Obr. 1** Rozložení napětí ve zkušební vzorku naměřené systémem ARAMIS

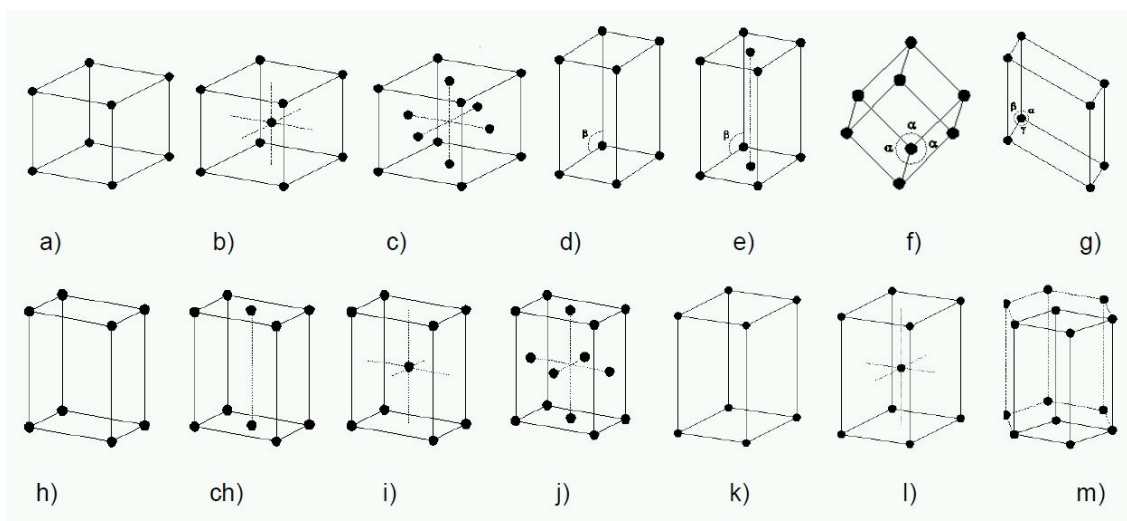
**Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže 2822 ze strany TUL v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.**

## 2 Deformační chování materiálů

Deformační chování je charakteristické pro každý materiál. V případě silového zatěžování kovových materiálů probíhá nejdříve tzv. elastická deformace (vratná, netrvalá), při které nedochází k trvalým změnám tvaru. Po překročení příslušné meze materiálu (mez kluzu) již dochází k trvalým změnám tvaru resp. rozměrů, tzv. plastická deformace. [1]

### 2.1 Krystalografická struktura kovů

Mezi základní vlastnosti kovů patří pravidelné uspořádání atomů v prostoru. Pravidelné uspořádání jednotlivých atomů v prostoru (po celém objemu materiálu) se nazývá krystalová mřížka, ve které se atomy kovu pravidelně opakují. Základní stavební prvek krystalografické struktury kovů je tedy krystalová mřížka. Pro krystalovou mřížku je charakteristické rozložení atomů dle určitého geometrického uspořádání. Základní struktura kovu je tvořena tzv. strukturní buňkou (jednoduchá strukturní jednotka). Tato strukturní buňka se posléze pravidelně opakuje v celém objemu kovu. Obecně rozlišujeme sedm základních krystalových soustav, ve kterých existuje čtrnáct elementárních buněk (Obr. 2). [1]



Obr. 2 Elementární buňky [1]

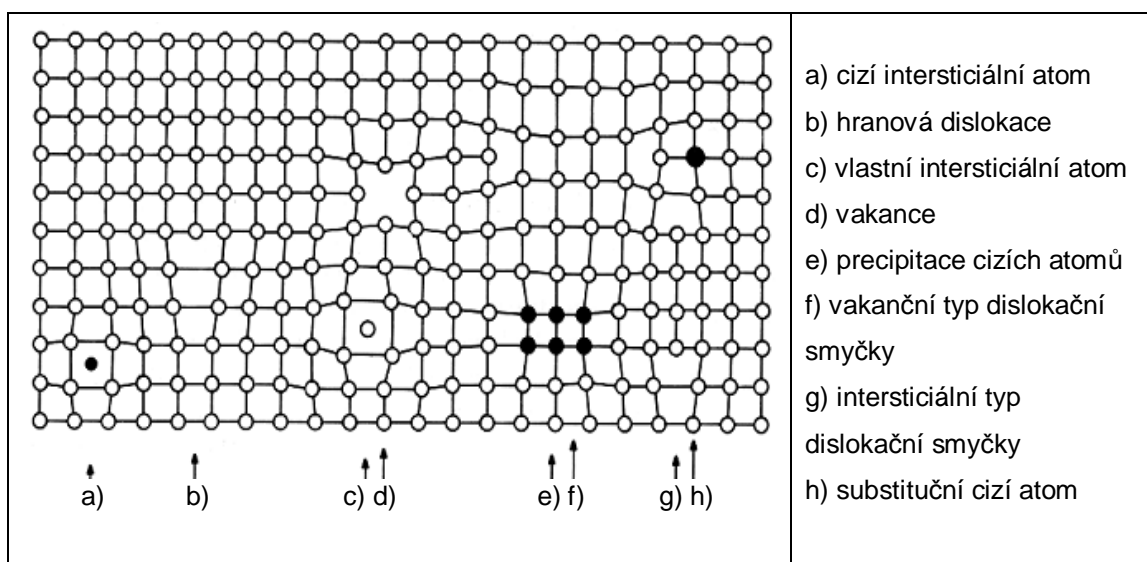
a) kubická prostá, b) kubická prostorově centrovaná, c) kubická plošně centrovaná, d) monoklinická prostá, e) monoklinická bazálně centrovaná, f) romboedrická prostá, g) triklinická prostá, h) ortorombická prostá, ch) ortorombická bazálně centrovaná, i) ortorombická prostorově centrovaná, j) ortorombická plošně centrovaná, k) tetragonální prostá, l) tetragonální prostorově centrovaná, m) hexagonální bazálně centrovaná

**Tab. 1** Jednotlivé typy mřížek pro nejběžnější kovy

Typ mřížky		Kov
Kubická	Plošně centrovaná mřížka (FCC)	Al, Cu, Ni, Fe <sub>γ</sub> , Pt, Au, Ag
	Prostorově centrovaná mřížka (BCC)	Fe <sub>α</sub> , Cr, Nb, Ta, V, W, Mo, Mn, βTi, βZr
Hexagonální mřížka (HCP)		Mg, Co, αTi, αZr, Zn, Be

### 2.1.1 Poruchy krystalových mřížek

Vlivem nečistot, pohyblivosti atomů a dalších vlivů mohou krystalové mřížky kovu obsahovat vady (poruchy). Tyto vady mají velký vliv na mechanické vlastnosti, proto je důležité, aby struktura reálného krystalu obsahovala vad co nejméně. Toto však neplatí v případě dislokací, jelikož pohyb, vznik a zánik dislokací usnadňuje proces plastické deformace. Nejčastější vady v krystalové struktuře kovů jsou na Obr. 3.



**Obr. 3** Poruchy ve stavbě krystalové mřížky [1]

## 2.2 Elastická deformace

Elastická (pružná) deformace je stav, kdy se materiál po zatížení vrátí zpět do původního tvaru (Obr. 4), jedná se tedy o deformaci vratnou. Pro popis průběhu elastické deformace slouží matematický vztah vyjádřený Hookovým zákonem pro normálové napětí  $\sigma$  a smykové napětí  $\tau$ . [1]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

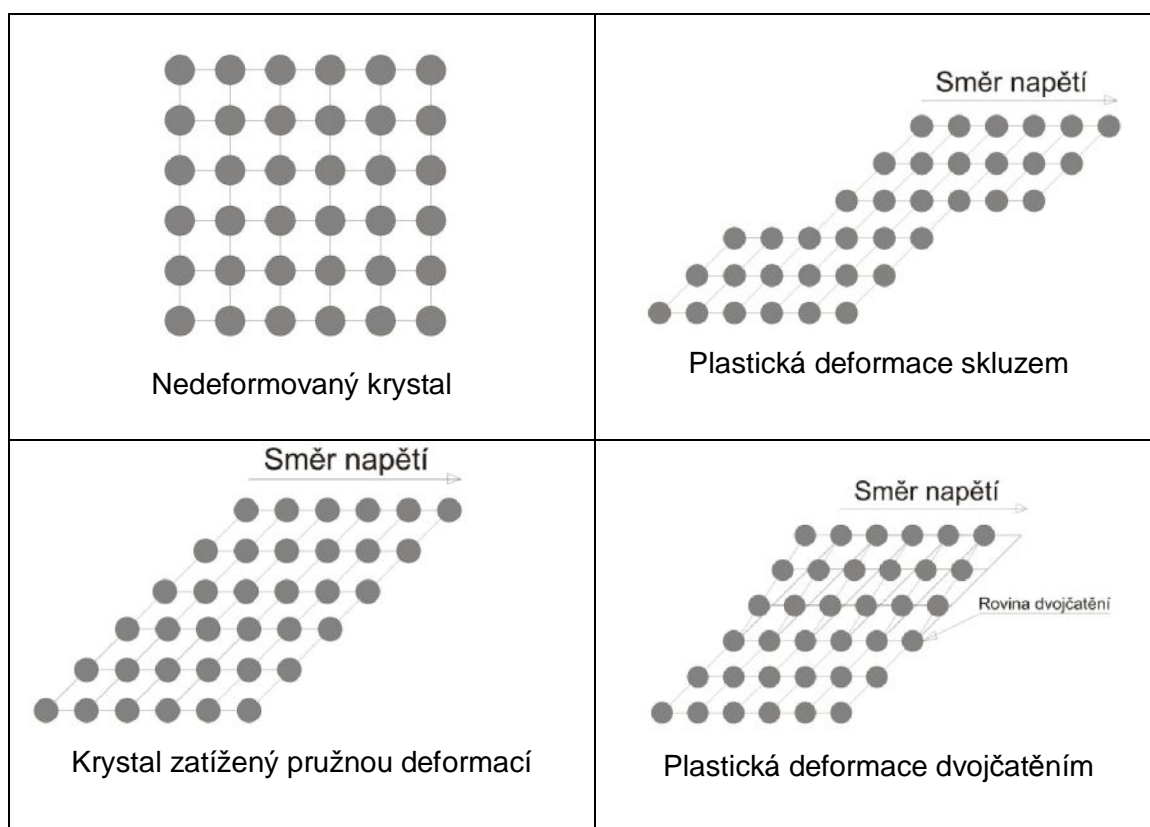
$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2)$$

Kde:

$E$ – modul pružnosti v tahu	[MPa]
$\varepsilon$ – poměrné prodloužení	[MPa]
$G$ – modul pružnosti ve smyku	[MPa]

## 2.3 Plastická deformace

Při plastické deformaci dojde na rozdíl od elastické deformace k trvalému porušení krystalové mřížky. Pro dosažení plastické deformace je nutné překonat tzv. mez kluzu, do které ještě dochází k elastické (pružné) deformaci. Nejdůležitějším mechanismem plastické deformace za tepla i za studena je skluz dislokací. Další mechanismus plastické deformace je dvojčatění. Mechanismus plastické deformace dvojčatěním je méně obvyklý než dislokační skluz. Aby nastalo dvojčatění, jsou nutné specifické podmínky jako rychlý průběh deformace, nízká teplota a chemické složení materiálu. Při tváření se vždy uplatňují všechny mechanismy plastické deformace najednou, dominantní je ale pouze jeden. Na Obr. 4 je zobrazen vlevo nahoře nedeformovaný krystal, vlevo dole krystal zatížený pružnou (elastickou) deformací. Vpravo nahoře je krystal deformovaný plastickou deformací skluzem a vpravo dole krystal deformovaný plastickou deformací dvojčatěním.



Obr. 4 Plastická deformace skluzem a dvojčatěním



### 3 Sortiment plechů používaných v automobilovém průmyslu

Oceli používané na stavbu automobilových karoserií lze obecně rozdělit na hlubokotažné a pevnostní. Všechny druhy ocelí se vyrábějí různými způsoby termomechanického zpracování s řízeným ochlazováním na širokopásových tratích. V následující kapitole je stručný přehled běžně používaných materiálů v automobilovém průmyslu. [3]

#### 3.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem mají zaručeny mechanické vlastnosti a svojí vysokou tvářitelností jsou předurčeny pro tvarově složité výlisky (např.: pohledové díly karosérie, na které jsou kladeny také nároky na povrchové vlastnosti). V závislosti na chemickém složení, mechanických vlastnostech a způsobu výroby byly hlubokotažné plechy rozděleny do několika skupin podle kvality. [2] [3] [6]

- CQ (**C**omercial **Q**uality) - plechy běžné kvality
- DQ (**D**rawing **Q**uality) - tažné plechy
- DDQ (**D**eep **D**rawing **Q**uality) - hlubokotažné plechy
- EDDQ (**E**xtra **D**eep **D**rawing **Q**uality) - zvlášť hlubokotažné plechy
- EDDQ-S (**E**xtra **D**eep **D**rawing **Q**uality-**S**uper) - super hlubokotažné plechy

Kromě označení standardně uvedeného rozdělení se ve výrobním provozu hlubokotažné plechy uklidněné hliníkem označují dle tabulky uvedené níže a to dle charakteristických mechanických vlastností. Materiál **DX 54** patří mezi materiály měřené v experimentální části.

**Tab. 2** Charakteristické vlastnosti hlubokotažných ocelí uklidněných hliníkem [3]

Označení	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_{80mm}$ [%]	$r_a$ [-]	n [-]	UH [-]	KUT [-]
<b>DX 51 D</b> (DDQ)	240-260	26-30	1,0-1,2	0,14-0,16	1,2-1,3	30-40
<b>DX 52 D</b> (DDQ)	220-240	30-36	1,2-1,4	0,16-0,18	1,3-1,4	40-50
<b>DX 53 D</b> (DDQ)	200-220	36-38	1,4-1,6	0,18-0,20	1,4-1,5	50-57
<b>DX 54 D</b> (EDDQ)	180-200	38-40	1,6-1,8	0,20-0,22	1,5-1,67	57-67
<b>DX 56 D</b> (EDDQ-S)	<180	> 40	>1,8	>0,22	>1,67	>67



### 3.2 IF (Interstitials Free) oceli

**IF** (Interstitials Free - oceli bez intersticií) oceli jsou dnes běžně používány pro stavbu automobilové karosérie. Interstiticky rozpustné atomy C a N jsou vázané ve formě stabilních karbonitridů (TiCN, NbCN). Toho je docíleno mikrolegováním niobem nebo titanem (či kombinací obou prvků). Snížením obsahu C a N ve formě tuhého roztoku dosáhneme výrazného zlepšení plastických vlastností oceli. Výsledné mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou také závislé na obsahu dalších legujících prvků způsobujících roztokové zpevnění, jako jsou například mangan a fosfor, dále pak na množství a rozptýlení precipitátů, velikosti feritického zrna a na úběru při hladicím válcování. [2] [3] [6]

### 3.3 Oceli s BH efektem

**BH** (**B**ake **H**ardened) efekt - je jakákoliv vysokopevnostní ocel, u níž je zvýšení pevnosti výsledkem kombinace deformace a stárnutí při teplotách a časech typických pro lakování části automobilu. Používají se u velkoplošných výlisků (střecha, dveře, kapota). Vyznačují se nízkou mezí kluzu, po zpracování a vypálení laku se zvýší mez kluzu o 30 – 80 MPa. Proces zpevnění po lisování a vypálení laku souvisí s deformačním stárnutím za tepla, které je podmíněné difúzí atomů uhlíku a dusíku k dislokacím vytvořeným v průběhu lisování. BH efekt se realizuje precipitačním zpevněním mikrolegujících prvků. Prvky, které mají vysoký vliv na BH efekt, jsou mangan, křemík a fosfor. Jedná se o feritickou ocel s množstvím hliníku a dalšími mikrolegujícími prvky, které mají vliv na konečné zpevnění. [2] [3] [6]

#### 3.3.1 Oceli se zvýšeným obsahem titanu resp. niobu

Množství legujících prvků Ti a Nb je pouze na takové úrovni, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku ve feritové mřížce zůstala i po válcování za tepla nevázaná na vzniklé karbidy legur. BH efekt potom probíhá za nižších teplot vypalování laku nebo žíhání. [2] [3] [6]

#### 3.3.2 Oceli se zvýšeným obsahem uhlíku

Intersticiální uhlík se při tváření těchto plechů prakticky nevyskytuje ve formě tuhého roztoku, proto je zaručena jejich vynikající hlubokotažnost. Vytvrzení se docílí rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince s okamžitým rychlým ochlazením. [2] [3] [6]



### 3.4 Vysokopevnostní materiály

Jeden ze způsobů snížení hmotnosti karosérie automobilu je redukce tloušťky plechu jednotlivých dílů. Pro tento případ je ovšem nutné nahradit takovéto díly vyrobené z klasických hlubokotažných ocelí plechy se zvýšenými mechanickými vlastnostmi. Proto byly vyvinuty plechy z vysokopevnostních ocelí. Vysokopevnostní oceli se již podle názvu vyznačují vysokou mezí pevnosti a mezí kluzu, mají také zároveň nízkou hodnotu tažnosti. [2] [3] [6]

#### 3.4.1 DP (Dual Phase) oceli

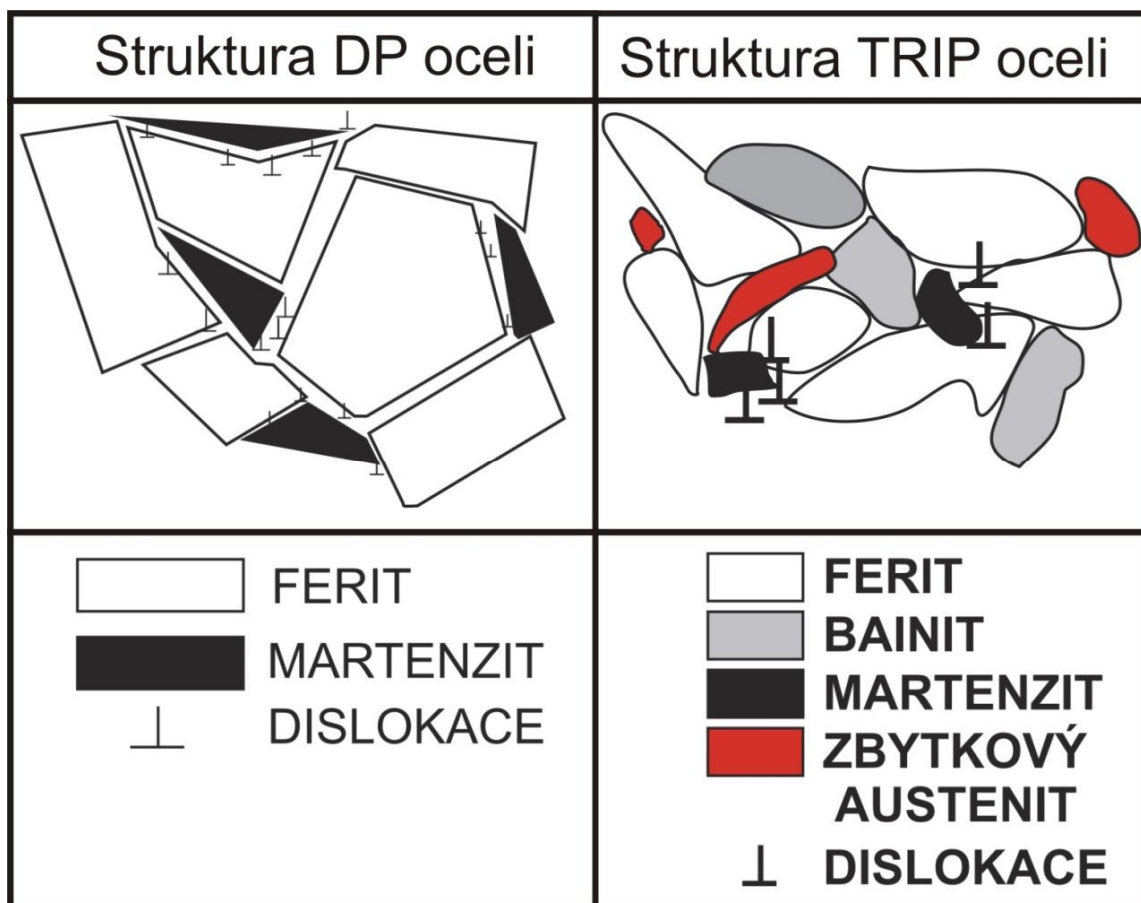
DP (**D**ual **P**hase - dvoufázové) oceli – dvoufázové oceli mají feritickou matici obsahující 20% až 70% malých ostrůvků martenzitu nebo bainitu. V materiálu je ponecháno větší množství uhlíku pro lepší kalitelnost a jsou do něj přidány legury Mn, Cr, V a Ni. Uhlík podporuje tvorbu martenzitu a současně zpevňuje ferit ve formě tuhého roztoku (viz Obr. 5) nebo jej lze použít pro BH efekt. U těchto ocelí mez kluzu nedosahuje ani 70% meze pevnosti ( $R_m \approx 1000 \text{ MPa}$ ), což je výhodné pro tváření.

Zástupcem dvoufázové oceli v experimentální části je materiál LITEC RAGAL 1000 vyráběný finskou firmou RAUTARUUKKI.[3]

#### 3.4.2 TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli

TRIP (**T**Ransformation **I**nduced **P**lasticity), oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Někdy se tyto TRIP materiály také nazývají oceli se zbytkovým austenitem. Jsou tvořeny feritem, bainitem a malým množstvím nepřeměněného zbytkového austenitu. Ten se během tváření přemění na tvrdý martenzit nebo se stabilizuje. Tyto oceli obsahují větší množství C, Si, případně Al než DP oceli a tím se sníží teplota  $M_f$  pod teplotu okolí, čímž se vytvoří zbytkový austenit (při nižším obsahu uhlíku v materiálu může dojít k vysokému zpevnění oceli již v průběhu tváření vlivem předčasného přetvoření austenitu, při vyšším obsahu uhlíku zůstává austenit nepřetvořen i po tvářecím procesu, tím se zvyšuje schopnost materiálu pohltit deformační energii například při nárazu automobilu na překážku). V experimentální části této diplomové práce je i zástupce TRIP ocelí - materiál RA-K 40/70 vyráběný německou firmou ThyssenKrupp. Na Obr. 5 vlevo je struktura TRIP (**T**Ransformation **I**nduced **P**lasticity) ocelí, ve struktuře jsou vidět čtyři fáze, ferit, bainit, martenzit a zbytkový austenit. [3]





Obr. 5 Struktura DP (Dual Phase) a TRIP (TRansformation Induced Plasticity) ocelí

### 3.4.3 CP (Complex Phase) oceli

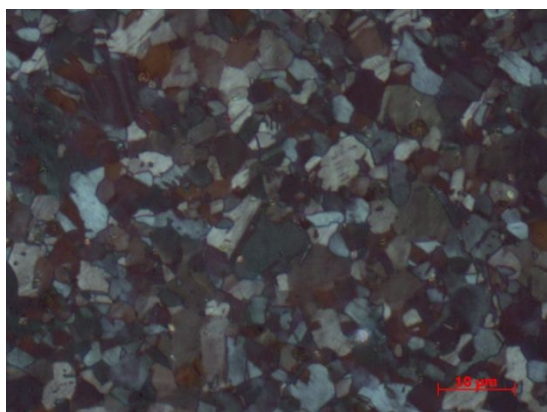
CP (**C**omplex **P**hase – vícefázové) oceli s jemnou strukturou, která je tvořena feritem, bainitem (horním i dolním), martenzitem a austenitem. Výroba a složení legur jsou podobné jako u DP a TRIP ocelí. Tyto oceli jsou mikrolegovány niobem, titanem či vanadem pro vytvoření jemného precipitátu. CP oceli vykazují vysoký stupeň deformačního zpevnění, mají velmi dobrou rozměrovou stálost výlisků a také mají dobrou schopnost absorbovat deformační energii při nárazu. Jeden z měřených vzorků v experimentální části je zástupce vícefázových ocelí - materiál CP-W 800 vyráběný německou firmou ThyssenKrupp. [3]

### 3.4.4 Martenzitické (MS) oceli

Martenzitické oceli jsou při své výrobě kalitelné a patří k nim i bórové oceli. V těchto ocelích je téměř všechn austenit transformován (během ochlazování na válcovací trati nebo následným ochlazováním ze žíhacích teplot) na martenzit. Jsou to materiály s mezí pevnosti, která může dosahovat i hodnot větších než 1500 MPa. Bývají popuštěny pro zlepšení jejich tažnosti, ale i tak se příliš nehodí pro tváření složitých dílů. Pro lepší kalitelnost je v těchto ocelích ponechán uhlík a jsou i legovány manganem, křemíkem, chromem, molybdenem, bórem, vanadem a niklem. [3]

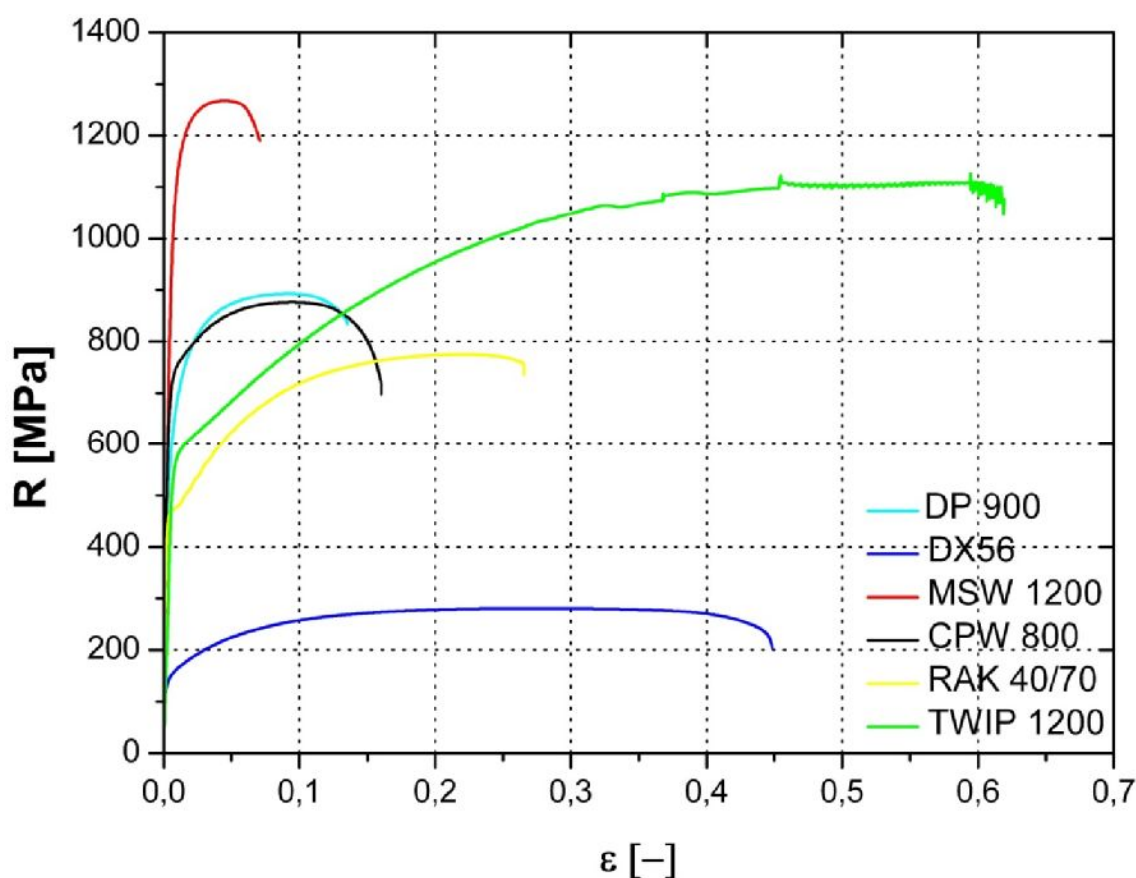
### 3.5 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli

TWIP (**T**Winning Induced **P**lasticity), oceli se zdvojenou indukovanou plasticitou obsahují v austenitické matici 15-25% Mn a dostačující množství Al a Si. Jsou velmi vhodnými materiály pro nosné díly konstrukce karosérie, které jsou vystaveny nadměrnému zatížení. TWIP oceli mají velmi vysokou pevnost (a to až 1000 MPa) a dobrou tvářitelnost (při nízké teplotě a vysoké rychlosti deformace). Pro dosažení TWIP účinku je nutné zajistit přesné složení slitiny takovým způsobem, že transformační energie nedovolí napětově indukovanému austenitu přeměnit se na martenzit, a dojde tak k mechanickému dvojčatění. Ukázku dvojčat vytvořených ve struktuře TWIP materiálu během deformace lze vidět na Obr. 6 (vpravo). [3][6]



**Obr. 6** Struktura TWIP materiálu před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

Na Obr. 7 je porovnání průběhu statické zkoušky tahem pro zástupce výše uvedených materiálů. Červenou barvou je vyznačena křivka mezních přetvoření pro materiál MS-W 1200, který je zástupcem martenzitických ocelí a vyznačuje se nejvyšší mezí pevnosti (na hranici 1300 MPa) a nejmenší tažností. Zeleně je vyznačen materiál TWIP 1200, který díky svým vlastnostem dosahuje při vysoké mezi pevnosti velmi vysoké tažnosti (materiál TWIP se v běžné praxi zatím nepoužívá). Dvoufázová ocel (materiál DP 900) je vyznačena světle modrou barvou, díky tvrdému feritu a velkému zpevnění dosahuje velké meze pevnosti (cca. 900 MPa) v kombinaci s malou tažností pod 15%. Černě označená tahová křivka je pro materiál CP-W 800, což je zástupce vícefázových ocelí s podobnými vlastnostmi jako dvoufázový materiál DP 900. Žlutě je označen zástupce TRIP ocelí materiál RA-K 40/70, který byl stejně jako materiál CP-W 800 použit pro měření v experimentální části této diplomové práce. Materiál RA-K 40/70 vykazuje na tahovém diagramu velkou tažnost (až téměř 30%) při vysoké mezi pevnosti (téměř 800 MPa). Poslední z tahových diagramů na Obr. 7 označený tmavě modrou barvou je zástupce hlubokotažných ocelí uklidněných hliníkem, materiál DX 56. Tyto tahové diagramy jsou uvedeny pouze jako názorná ukázka pro porovnání mechanických vlastností materiálů uvedených v této kapitole.

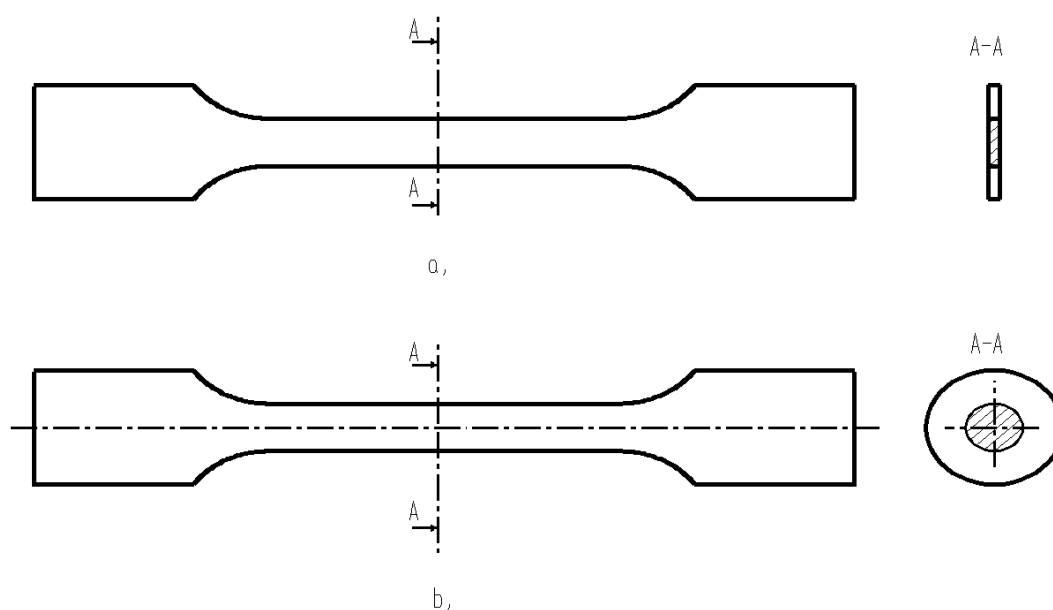


**Obr. 7** Tahové zkoušky pro oceli běžně používané v automobilovém průmyslu

## 4 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem patří k nejdůležitějším zkouškám určujícím základní hodnoty mechanických vlastností materiálů. Zkouška je normalizovaná a to dle normy EN – ISO 6892-1. Jedná se tedy o zkoušku probíhající za normou předepsaných teplotně – rychlostních podmínek ( $T-c(\dot{\varphi})$ ), teplota – deformační rychlost). Podle této normy mohou být zkušební tyče tzv. poměrné nebo nepoměrné. Poměrná zkušební tyč má kruhový průřez a nepoměrná zkušební tyč má průřez obdélníkový. Zkušební tyč je upnuta do čelistí stroje a leží v ose stroje tak, aby síla procházela osou zkušební tyče. Při namáhání zvětšující se tahovou silou dochází k deformaci a prodlužování zkušební tyče, dokud nedojde k jejímu přetržení. Tahová zkouška probíhá ve dvou fázích. V první fázi do meze pevnosti je deformace rovnoměrná s jednoosým stavem napjatosti, v druhé fázi vznikne lokální zúžení (krček), deformace je nerovnoměrná a dojde k porušení zkušební tyče. Stroj během zkoušky zaznamenává zatěžující sílu a příslušné prodloužení  $\Delta L$  zkušební tyče průtahoměrem. Tyč se prodlužuje z počáteční naměřené délky  $L_0$  na konečnou délku po přetržení  $L_u$  a počáteční plocha  $S_0$  se mění na plochu po přetržení  $S_u$ . Podíl zatěžující síly  $F$  a plochy  $S_0$  se nazývá smluvní, nebo také jmenovité napětí. Základní výsledky statické zkoušky tahem jsou pracovní, smluvní a skutečný tahový diagram. [2]

Obr. 8 znázorňuje poměrnou a nepoměrnou zkušební tyč pro zkoušku tahem. Poměrná zkušební tyč (horní obrázek) má obdélníkový průřez (většinou vystřihována nebo vyříznuta z plechu). Nepoměrná zkušební tyč má kruhový průřez a bývá zhotovena obráběním nebo odlitím.



**Obr. 8** Poměrná a nepoměrná zkušební tyč pro zkoušku tahem

## 4.1 Hlavní a vedlejší ukazatele zkoušky tahem

Ze statické zkoušky tahem můžeme vyhodnotit řadu ukazatelů, podle významnosti a stupně výpočtu dělíme tyto ukazatele na hlavní a vedlejší. Hlavní ukazatele jsou materiálové konstanty počítané přímo z tahové zkoušky, vedlejší ukazatele bývají odvozené od hlavních ukazatelů, ale i přesto jsou velmi důležité pro posouzení tvárnosti. Diagram znázorňující zatěžující sílu v závislosti na prodlužování zkušební tyčky se nazývá pracovní diagram.

Přepočet hodnot z pracovního na smluvní tahový diagram

Smluvní napětí:

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

kde:  $F$  - zatěžující síla při tahové zkoušce [N]

$S_0$  - počáteční průřez zkušební tyčky [mm<sup>2</sup>]

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [-] \quad (4)$$

kde:  $\Delta L$  - prodloužení zkušební tyčky [mm],

$L_0$  - počáteční délka zkušební tyčky [mm].

Výpočet a odvození skutečného tahového diagramu je uveden v kapitole 4.2.1.

### 4.1.1 Hlavní ukazatele zkoušky tahem

Jak je uvedeno výše, základní ukazatele statické zkoušky tahem jsou vypočteny dle naměřených hodnot tahové zkoušky. Hlavní ukazatele charakterizují jednotlivé materiály hlavně z hlediska pružnosti, pevnosti a slouží k vzájemnému porovnání jednotlivých materiálů mezi sebou. Mezi základní ukazatele patří: [6]

**Mez kluzu  $R_e$**  určuje hranici napětí, nad kterou vznikají plastické (nevratné) deformace. Mez kluzu lze lišit na výraznou a nevýraznou. U výrazné meze kluzu, která je typická pro deformačně vystárlé materiály dělíme mez kluzu na dolní ( $R_{eH}$ ) a horní ( $R_{eL}$ ), pro výpočet pak využíváme sílu naměřenou na této výrazné mezi kluzu ( $F_e$ ).

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

kde:  $F_e$  - síla odpovídající výrazné mezi kluzu [N]



**Nevýrazná mez kluzu  $R_{p0,2}$**  – vzhledem k těžko stanovitelnému bodu meze kluzu v tahovém diagramu stanovujeme tuto hodnotu jako sílu odpovídající absolutní deformaci  $\Delta L = 0,2\%$  ( $\varepsilon = 0,002$ ), vypočteme ji tedy takto:

$$R_{p0,2} = \frac{R_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (6)$$

kde:  $F_{p0,2}$  - síla odpovídající trvalé absolutní deformaci  $\varepsilon = 0,2$  [-]

**Mez pevnosti  $R_m$**  vypočtené poměrem maximální síly  $F_m$  vztažené k původnímu průřezu.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (7)$$

kde:  $F_{\max}$  - maximální naměřená síla [N]

**Tažnost  $A_x$**  se vypočítá jako maximální poměrné prodloužení  $\varepsilon_u$  vyjádřené v procentech.

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (8)$$

$$A_x = 100 \cdot \varepsilon_u = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} [\%] \quad (9)$$

kde:  $L_u$  - délka po přetržení vzorku [mm]

$\varepsilon_u$  - maximální poměrné prodloužení [-]

**Kontrakce  $Z$**  se využívá především u kruhových (poměrných) zkušebních vzorků a je to poměr průřezu vzorku po přetržení vůči původnímu průřezu vyjádřený v procentech. [6]

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

kde:  $S_u$  - průřez tyče v místě přetržení [mm<sup>2</sup>]



#### 4.1.2 Vedlejší ukazatele zkoušky tahem

Na základě hlavních ukazatelů jsou odvozeny vedlejší ukazatele zkoušky tahem. Tyto ukazatele nám udávají charakteristiku materiálu z hlediska tvářitelnosti a vhodnosti použití jednotlivých technologií. [6]

**Ukazatel hlubokotažnosti UH** je důležitý zejména při stanovování parametrů plechu po hluboké tažení, tento ukazatel je bezrozměrný a vypočte se jako:

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} [-] \quad (11)$$

**Zásoba plasticity ZP** určuje také tvářitelnost při hlubokém tažení, zásoba plasticity je z velké části ovlivněna také tažností daného materiálu.

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot A_x [MPa] \quad (12)$$

kde:  $k$  - koeficient zaplnění plochy [-]

**Komplexní ukazatel tvářitelnosti KUT** je kombinace dvou výše uvedených ukazatelů a udává schopnost materiálu odolávat deformaci a zároveň udává jeho tvářitelnost. [6]

$$KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \cdot A_x [-] \quad (13)$$



## 4.2 Smluvní a skutečný tahový diagram

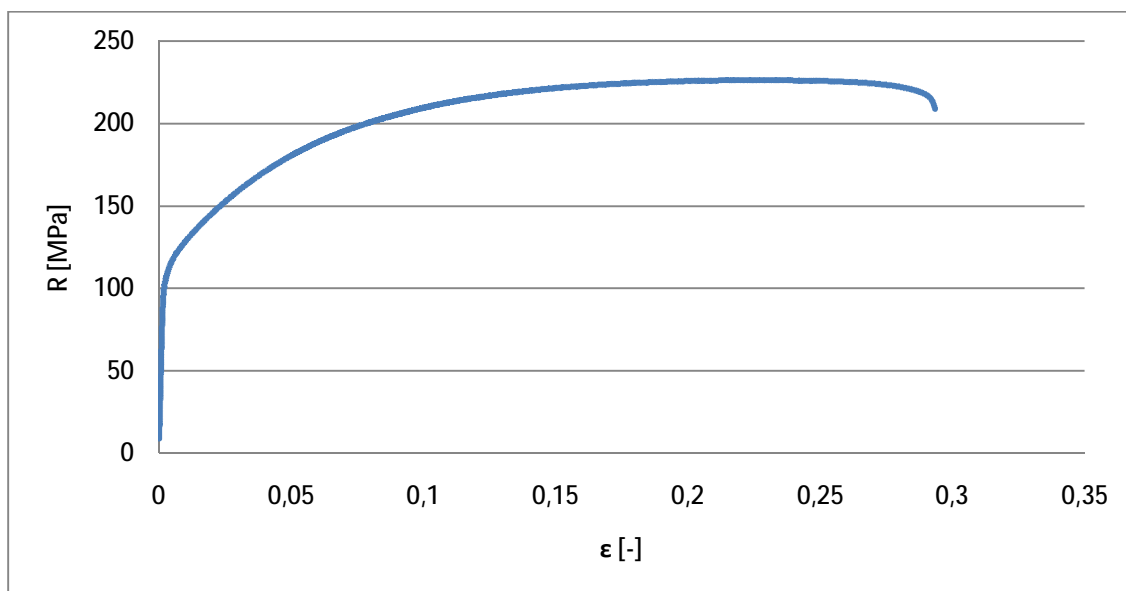
Při tahové zkoušce měříme základní hodnoty prodloužení  $\Delta L$  [mm] a zatěžující sílu  $F$  [N]. Diagram, který vyjadřuje závislost prodloužení na zatěžující síle, se nazývá pracovní diagram. Z důvodů vzájemného porovnání tahových diagramů vzorků stejných materiálů s různými průřezy se pracovní diagram nepoužívá. Používá se smluvní nebo skutečný tahový diagram, který zohledňuje průřez zkušebního vzorku.

### Smluvní tahový diagram

Smluvní tahový diagram je vypočten ze vstupních hodnot (počáteční rozměry zkušební tyče) a naměřených hodnot z pracovního diagramu. Tento diagram vyjadřuje závislost smluvního napětí  $R$  [MPa] a poměrného prodloužení  $\varepsilon$  [-]. Ukázka smluvního tahového diagramu pro hlubokotažnou ocel je na Obr. 9.

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [%]} \quad (4)$$

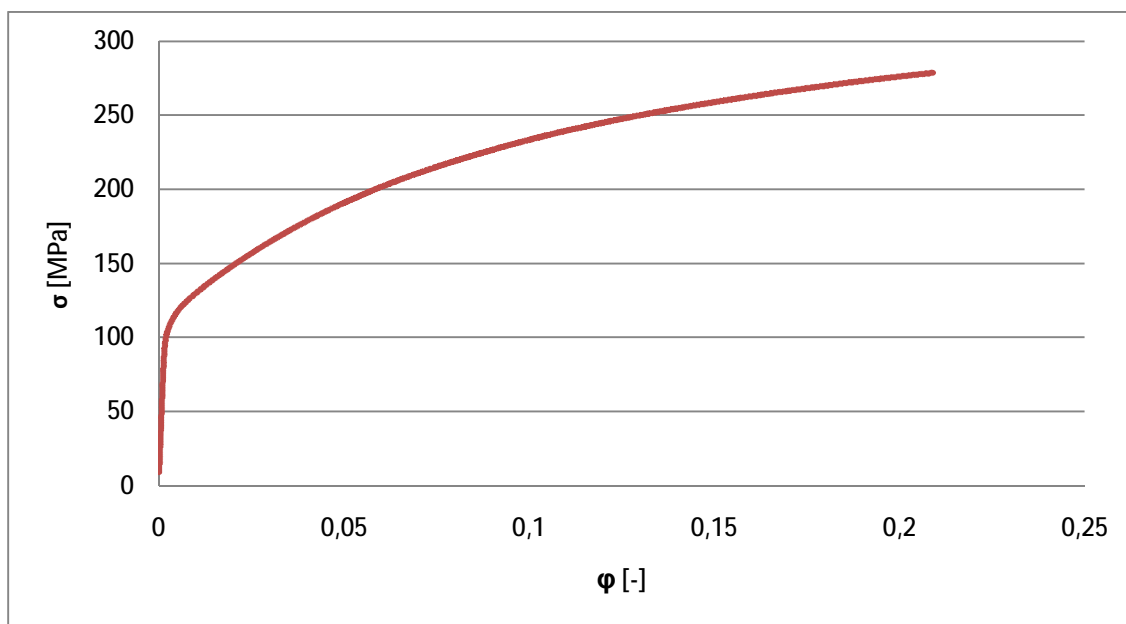


**Obr. 9** Ukázka smluvního tahového diagramu pro běžnou hlubokotažnou ocel



### Skutečný tahový diagram

Skutečný tahový diagram vyjadřuje závislost napětí  $\sigma$  [MPa] na přetvoření  $\varphi$  [-]. Přepočet hodnot ze smluvního na skutečný diagram je uveden v kapitole 4.2.1, podle normy EN – ISO 6892-1 se skutečný tahový diagram zobrazuje pouze do meze pevnosti. Ukázka skutečného tahového diagram pro hlubokotažnou ocel je na Obr. 10.



**Obr. 10** Skutečný tahový diagram pro hlubokotažnou ocel do meze pevnosti

#### Napětí $\sigma$

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) [\text{MPa}] \quad (14)$$

#### Přetvoření $\varphi$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) [-] \quad (15)$$

Vztahy (14) a (15), které platí pro skutečný tahový diagram (napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\varphi$ ), jsou odvozeny v následující kapitole.



#### 4.2.1 Přepočet mezi smluvním a skutečným tahovým diagramem

Přepočet smluvního diagramu na skutečný vychází ze základních naměřených hodnot při zkoušce tahem a ze zákona zachování objemu při tváření (zákon nestlačitelnosti), dále se využívá vztah pro výpočet deformace.

##### Přepočet smluvního a skutečného napětí:

Vztah pro smluvní napětí (3) a skutečné napětí (16)

$$R = \frac{F}{S_0} [MPa] \qquad \sigma = \frac{F}{S} [MPa] \qquad (3) \text{ a } (16)$$

Vztah pro poměrné (4) a skutečné přetvoření (17)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [-] \qquad d\varphi = \frac{dL}{L} [-] \qquad (4) \text{ a } (17)$$

Dále použijeme zákon zachování objemu (18) a upravíme ho do tvaru (19)

$$V_0 = V \qquad L_0 \cdot S_0 = L \cdot S \qquad (18) \text{ a } (19)$$

$$\frac{S_0}{S} = \frac{L}{L_0} \qquad L = \Delta L + L_0 \qquad (20) \text{ a } (21)$$

Dosazením získáme vztah (22)

$$R \cdot S_0 = \sigma \cdot S \qquad (22)$$

Dosazením ze vztahů (18) až (25) dostaneme vztah (26) a vyjádříme napětí  $\sigma$ . Za počáteční a skutečný průřez dosadíme vztahy vyjádřené ze zákona zachování objemu. Nakonec dosadíme vztah (25) a získáme konečný tvar přepočtu mezi smluvním a skutečným napětím (14).

$$\sigma = \frac{R \cdot S_0}{S} = R \cdot \frac{\Delta L + L_0}{L_0} = R \cdot (1 + \varepsilon) [MPa] \qquad (14)$$

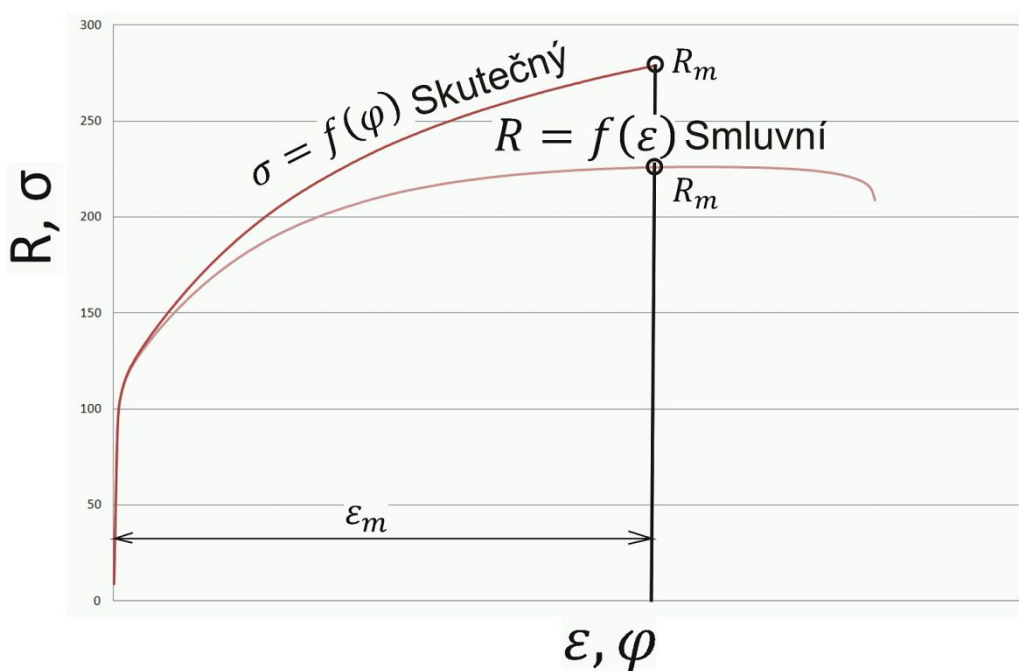
### Přepočet skutečné a smluvní deformace:

Vztah (17) pro výpočet přetvoření integrujeme v mezích od počáteční po konečnou délku, abychom dostali vztah (24).

$$d\varphi = \frac{dL}{L} \quad d\varphi = \int_{L_0}^L \cdot \frac{dL}{L} \quad (17) \text{ a } (24)$$

Po dosazení vztahu (17) a (24) získáme finální vztah pro přepočet skutečné a smluvní deformace.

$$\varphi = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{\Delta L + L_0}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon) [-] \quad (15)$$



**Obr. 11** Smluvní a skutečný tahový diagram v jednom grafu [8]

### 4.3 Aproximace zkoušky tahem

Aproximace zkoušky tahem se provádí pro zjištění charakteristických vlastností materiálu a mají velký význam v oblasti simulací tvářecího procesu. Pro statickou zkoušku tahem existuje celá řada aproximací. V Tab. 3 jsou uvedeny základní způsoby a nejpoužívanější aproximace zkoušky tahem. V experimentální části byly použity aproximace dle ČSN ISO 102 75 a EN 10 130. K aproximaci je využit smluvní tahový diagram  $\sigma - \varphi$ .

**Tab. 3** Používané aproximace a jejich rozsahy

Norma	Rozsah aproximace
ČSN ISO 102 75	od přetvoření 0,05 do hodnoty maximálního přetvoření (meze pevnosti $R_m$ )
EN 10 130	od přetvoření 0,1 do přetvoření 0,2 (nedosahuje-li materiál přetvoření 0,2, tak aproximujeme v intervalu přetvoření 0,1 - 0,15)
ASTM E 646 - 78	není určen přesný interval, pouze stanoví dolní hranici na mezi kluzu a horní hranici mez pevnosti

Tab. 3 ukazuje přehled nejpoužívanějších normalizovaných způsobů aproximace tahové zkoušky. První způsob aproximace dle ČSN ISO 102 75 je vhodný pro všechny ocelové materiály, protože rozsah aproximace je od malého stupně přetvoření, kterého dosáhnou téměř všechny druhy ocelí. Aproximace dle ČSN ISO 102 75 byla v experimentální části využita u všech měřených vzorků. Způsob aproximace dle EN 10 130 je vhodný pro materiály dosahující minimální přetvoření  $\varphi = 0,15$ , pokud materiál není schopen tohoto přetvoření, nelze pro něho tato aproximace použít (v experimentální části této práce byla aproximace dle EN 10 130 použita pro materiál DX 54 a RA-K 40/70, u materiálu CP-W 800 a LITEC RAGAL 1000 bylo přetvoření  $\varphi$  menší než 0,15, (tudíž jsme tuto aproximaci u těchto materiálů nemohli použít). Poslední metoda dle ASTM E 646 – 78 není tolik využívána jako předešlé metody a v této práci jsme tuto aproximaci tahové zkoušky u měřených vzorků nepoužili, má však výhodu ve stanovení pouze dolní a horní hranice aproximace a její interval můžeme libovolně volit, zvolený interval však může mít vliv na přesnost aproximace. Maximální deformace, do které se může aproximovat u všech uvedených metod, je mez pevnosti, po překročení meze pevnosti je proces nekontrolovatelný a nestabilní.

### Aproximace reálných křivek v oblasti rozvinutých plastických deformací

Tyto aproximace jsou v praxi využívány v oblasti plošného tváření za studena. Materiálové charakteristiky, které se zjišťují touto aproximací, jsou modul monotónního zpevnění  $C$  a exponent deformačního zpevnění  $n$  – platí níže uvedený vztah odvozený z aproximace dle Swifta (31). [8]

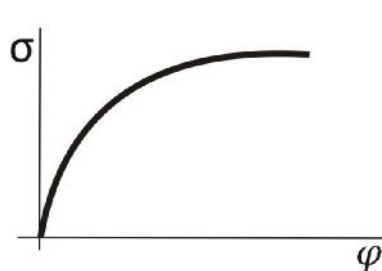
$$\sigma = C \cdot \varphi^n [\text{MPa}] \quad (24)$$

Kde:

- $C$  - modul monotónního zpevnění [MPa]
- $n$  - exponent deformačního zpevnění [-]
- $\varphi$  - skutečné přetvoření [-]

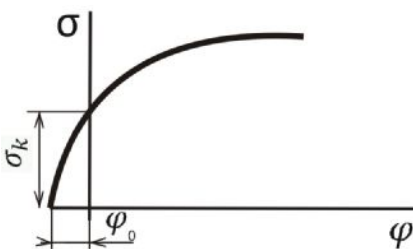
Tab. 4 znázorňuje princip aproximace dle Swifta, vlevo je zobrazen průběh aproximace a vpravo vztahy pro aproximaci. Tato aproximace je pro reálné křivky do oblasti rozvinutých plastických deformací (do meze pevnosti). [8]

Tab. 4 Aproximace dle Swifta

Aproximace dle Swifta	
	$\sigma = C \cdot \varphi^n$ $\sigma = \sigma(\varphi)$
	kde: $\sigma$ – skutečné napětí [MPa] $C$ - modul monotónního zpevnění [MPa] $\varphi$ – skutečné přetvoření [-] $n$ - exponent deformačního zpevnění [-]
	Aproximace reálných křivek do oblasti rozvinutých plastických deformací

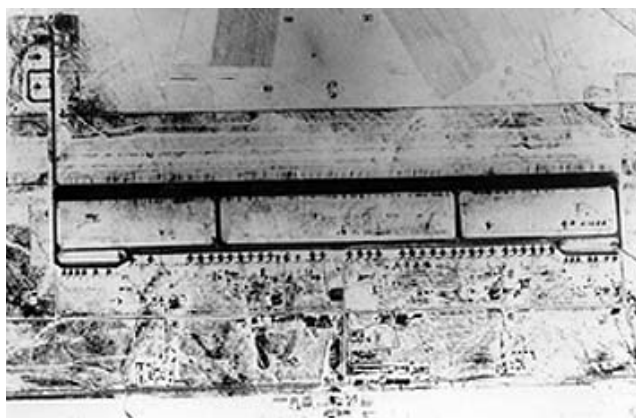
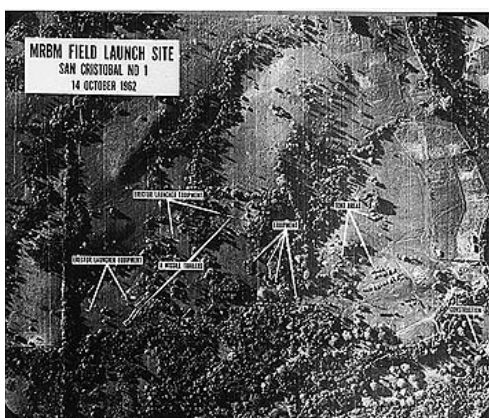
Tab. 5 vpravo zobrazuje aproximaci dle Swift – Krupkowski. Tato aproximace se využívá u neželezných kovů.[8]

Tab. 5 Aproximace dle Swift - Krupkowski

Aproximace dle Swift-Krupkowski	
	$\sigma = C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n$
	Kde: $\sigma$ - napětí [MPa] $C$ - modul monotónního zpevnění [MPa] $\varphi_0$ – posunutí křivky zpevnění [-] $\varphi$ - přetvoření [-] $n$ - exponent deformačního zpevnění [-]
	Aproximace reálných křivek do oblasti rozvinutých plastických deformací

## 5 Bezkontaktní optické systémy – fotogrammetrie

Fotogrammetrii lze obecně definovat jako vědní obor zabývající se zpracováním vlastností objektů z fotografických snímků. Název fotogrammetrie je odvozen od vyhodnocování informací z fotografických snímků. Obecně se používá pro zjišťování rozměrů, rekonstrukcí tvarů, určování polohy předmětů na snímcích v různých oborech, kde je možné zjistit informace z jednoho, nebo více snímků. Za prvního člověka, který použil metodu fotogrammetrie, je považován v rámci centrálního promítání Leonardo Da Vinci. Ten využil dírkovou komoru k překreslení pozorovaného. První využití fotogrammetrie z hlediska vyhodnocení snímků je datováno již od roku 1851 dvojicí Aime Laussedat a Albrecht Meydenbauer, kteří v tomto roce vydali teoretickou práci o fotogrammetrii Métrophotographie. První praktické využití bylo v roce 1861 s použitím fotografií Země v tvorbě topografických map. Tento obor se původně využíval v oblasti geodesie, s rozvojem techniky a vývojem technologie se však rychle rozrostl téměř do všech oborů vědy. Největší rozvoj fotogrammetrie je však úzce spjat s válečnými konflikty, kdy se za použití leteckých fotografií zjišťovala poloha nepřítelů a velikost základen, techniky a další strategická data, kromě letecké fotogrammetrie ji dnes běžně využíváme pro digitalizaci tvarů a povrchů, měření kinematických veličin. [10]



**Obr. 12** Využití letecké fotogrammetrie koncem v roce 1962 a koncem 50. let [11]

Na Obr. 12 vlevo je snímek krajiny z období Kubánské raketové krize v roce 1962, kdy pořízené snímky sloužily ke zjištění polohy a počtu jaderných hlavic umístěných v této oblasti. Vpravo je snímek pořízený americkým letectvem z konce 50. let, na kterém jsou vyznačeny strategicky důležité cíle (letišť). Oba tyto snímky patří do období rozvoje tohoto oboru, před tímto obdobím byla fotogrammetrie využita ve druhé a částečně také v první světové válce. V dnešní době je využití fotogrammetrie velmi rozsáhlé a to prakticky ve všech oborech. Od dob prvotního využívání se značně zlepšily optické systémy pro měření, pořizování snímků a hlavně kvalita pořízených fotografií.

## 5.1 Princip metod fotogrammetrie

Vzhledem k rozsahu oborů využívajících fotogrammetrii existuje velké množství principů pořizování záznamů a jejich vyhodnocování. V této práci uvedeme v obecné rovině pouze základní dělení fotogrammetrie a to podle místa pořízení bodů a jejich vzdálenosti:

- Ø Vesmírná, snímky ze satelitů a snímačů se vzdáleností > 200 km
- Ø Letecké snímky ze vzdálenosti řádově několik kilometrů
- Ø Pozemní snímky z povrchu v řádech stovek metrů dle viditelnosti
- Ø Blízká, blízké fotografie do stovek metrů
- Ø Makro, makroskopické záběry

V počátcích fotogrammetrie bylo běžné pořízení jednoho snímku a vyhodnocování v rovinných souřadnicích, s rozvojem techniky je dnes běžná tzv. stereografie (snímání objektu ze dvou bodů a získání prostorového obrazu). Na tomto principu dnes pracují moderní měřicí systémy a 3D skenery, které umožňují rychlou a přesnou digitalizaci měřených objektů. Podle počtu pořízených snímků lze provést další ze způsobů základního dělení a to:

- Ø Jednosnímková, pro vyhodnocování rovinných souřadnic.
- Ø Dvousnímková, která umožňuje vytvoření prostorových souřadnic.
- Ø Vícesnímková, kde potřebujeme měřit více parametrů, dle toho stanovíme počet snímků.



**Obr. 13** Princip fotogrammetrie v geodesii [12]

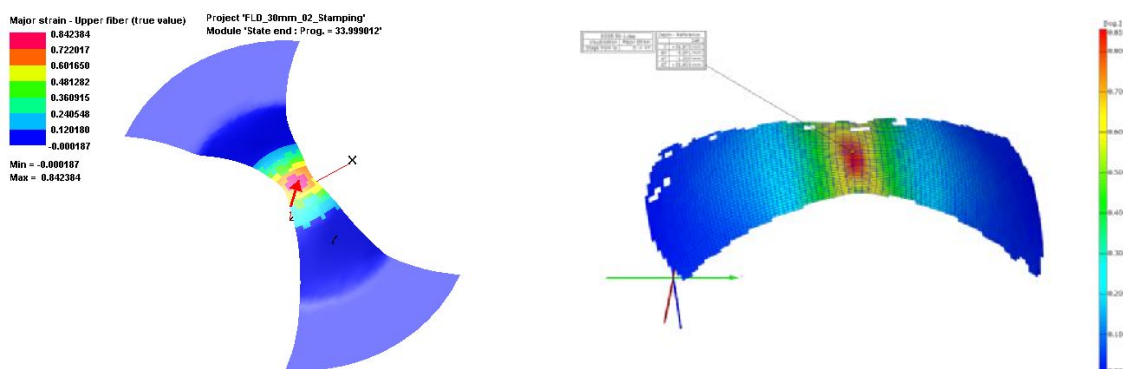
Na Obr. 13 je princip fotogrammetrie využívané v geodesii, pořizování leteckých snímků a vyhodnocení polohy a rozměrů objektů a reliéfů na Zemi. Zároveň je letadlo, které pořizuje snímek, snímáno vesmírnými satelity a samotný princip fotogrammetrie je použit i pro výpočet polohy, velikosti objektu, rychlosti i zrychlení letadla.



## 5.2 Měření deformace optickými systémy firmy GOM

V praxi existuje velké množství metod založených na principu fotogrammetrie, s jejichž pomocí lze měřit rozměrové a kinematické veličiny. Měření optickými systémy je nyní nepostradatelné v oblasti přípravy výroby, ve výrobě prototypů, kontrole a měření. Měřit lze statické i dynamické objekty v reálném čase. Měření rozměrových veličin se využívá zejména při digitalizaci objektů a tvorbě CAD modelů. Měření kinematických veličin je vhodné nejen pro vyšetřování pohybů, ale i pro zjišťování deformačního chování, stavů napjatosti a dimenzování součástí. Jeden z předních světových výrobců optických měřících systémů je německá firma GOM. V experimentální části této práce budeme využívat právě měřící systém ARAMIS od firmy GOM. V teoretické části se tedy budeme věnovat základním a nejpoužívanějším měřícím systémům vyráběným právě německou firmou GOM. V technické praxi existuje široká škála bezkontaktních měřících systémů od různých výrobců. Vzhledem k rozsahu této práce se však principem dalších měřících systémů nemůžeme zabývat a budeme se v teoretické části věnovat třem nejpoužívanějším a nejznámějším bezkontaktním měřícím systémům pro měření deformace od německé firmy GOM, a to systému ARAMIS, ARGUS a PONTOS. Kromě těchto tří systémů vyrábí německá firma GOM ještě hojně požívaný systém ATOS, který slouží k bezkontaktnímu měření povrchů a je určen spíše pro oblast 3D skenování, vzhledem k tématu této diplomové práce se principem tohoto systému zabývat nebudeme.

Na Obr. 14 je patrná jedna z možných základních aplikací optických systémů. V tomto případě se jedná o možnost rychlého srovnání výsledků z numerické simulace (zde PAM-STAMP 2G) a reálných přetvoření na geometricky stejném vzorku.



**Obr. 14** Ukázka výsledků numerické simulace a bezkontaktního optického měření deformace (zde pro měření FLD)



### 5.2.1 Měřicí systém ARAMIS

V této diplomové práci je pro měření v experimentální části využit právě měřicí systém ARAMIS, tudíž se jeho principu budeme v této kapitole věnovat podrobněji. ARAMIS využívá ke snímkování dvě kamery. Jedná se tedy o dvousnímkový měřicí systém (stereografický) a dvě kamery nám poskytují prostorový obraz.

Aby bylo možné provádět měření, musí být měřený vzorek opatřen deformační sítí, tzv. patternem. Tato deformační síť je zcela odlišná než běžně používané deformační sítě a její vzhled souvisí se způsobem vyhodnocování. Analýza deformace vychází z posunu tzv. fazet [px] (rozlišených měřicím systémem dle stupně šedi na zkušebním vzorku). Měřicí systém ARAMIS rozdělí deformační síť na jednotlivé fazety [px], v těchto fazetách změří poměr plochy černé a bílé barvy a podle tohoto poměru přiřadí stupeň šedi. Fazety na vzorku se překrývají z důvodu spojitosti měření, doporučené překrytí je cca. 30%. Deformační síť proto musí být nanášena černou a bílou barvou, a to stochasticky. V praxi se toto provádí odmaštěním zkušebního vzorku a nástřikem bílé barvy na očištěný vzorek, poté se vzorek „popráší“ černou barvou, aby vznikla výše uvedená deformační síť černo-bílé barvy se stochastickým rozložením barev, tzv. pattern. Na deformační síti nesmí vzniknout bílá místa, nebo naopak větší černé fleky. Charakteristický vzhled deformační sítě je zobrazen dole na obrázku Obr. 15. [12][13]

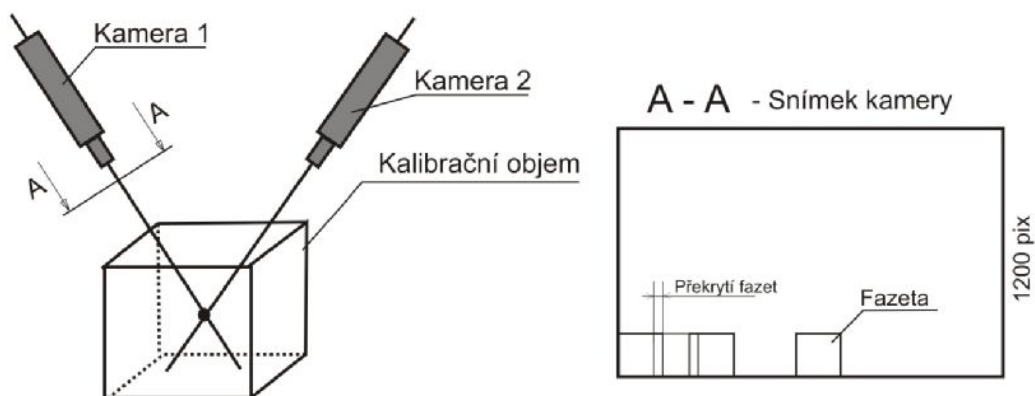


**Obr. 15** Deformační síť pro měřicí systém ARAMIS, tzv. pattern

Kamery měřicího systému ARAMIS nemají automatické zaostřování, proto je dalším důležitým krokem kalibrace měřicího systému. K tomu se využívá speciální kalibrační destička (Obr. 17 vlevo) opatřená souřadným systémem a specifickými znaky, tzv. kalibračními body. Před kalibrací umístíme kamery před zkušební vzorek. Kalibraci provádíme otáčením a změnou polohy destičky podle pokynů měřicího systému, dokud není systém dostatečně přesně kalibrován.

Dvojice kamer po kalibrování vytvoří tzv. kalibrační objem (Obr. 16). Kamery zpracovávají obraz dle nastavené frekvence snímání a ukládají ho přes řídicí trigger do PC. Vyhodnocení celého měření je pak prováděno obsluhou pomocí příslušného softwaru. Software vyhodnocuje vzájemné posunutí jednotlivých fazet na zkušebním vzorku, tím můžeme vyhodnotit jejich polohu, rychlost a zrychlení v každém časovém okamžiku dle nastavení frekvence snímání, z těchto naměřených hodnot získáváme požadované měřené veličiny.

Na Obr. 16 (vlevo) je znázorněn kalibrační objem obou kamer. Každý bod umístěný mimo kalibrační objem nelze použít při výpočtu, takže všechny body mimo kalibrační objem jsou pro vyhodnocení nepoužitelné. Vpravo v řezu A - A na Obr. 16 je snímek kamery a na něm jsou znázorněny výše uvedené fazety a jejich překrytí. Velikost a překrytí fazet [px] můžeme libovolně nastavit. [12][13]



**Obr. 16** Kalibrační objem pro kamery měřícího systému ARAMIS

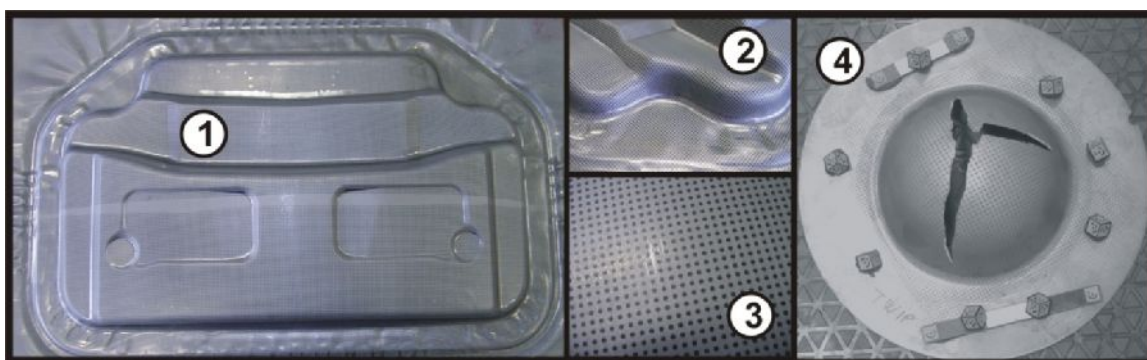
Obr. 17 znázorňuje vlevo kalibrační destičku pro bezkontaktní měřící systém ARAMIS. Vpravo jsou na stativu po bocích umístěny dvě kamery s vysokým rozlišením. Uprostřed jsou umístěny dvě polarizovaná světla jako přídatná osvětlení. Ve středu systému je laserový hledáček pro snadnější orientaci před kalibrací.



**Obr. 17** Kalibrační destička a Dvojice kamer pro systém ARAMIS

### 5.2.2 Měřicí systém ARGUS

Systém ARGUS je bezkontaktní měřicí systém pro měření deformací při lisování plechů. Tento měřicí systém se využívá pro analýzu deformace výlisků, kdy nemáme možnost proces sledovat kontinuálně po celou dobu průběhu. Na rozdíl od systému ARAMIS a PONTOS, ARGUS používá pouze jednu kameru a prostorový obraz získáme skládáním snímků pořízených z více poloh. Při měření analyzujeme počáteční a koncový stav. Při analýze a pořizování snímků počátečního a konečného stavu jsou důležité kalibrační kameny ve tvaru „hrací kostky“ umístěné po okraji vzorku, na těchto kamenech jsou umístěny kalibrační body, pomocí kterých se systém kalibruje a dokáže rozpoznat stav jednotlivých elementů výlisku před a po lisování (Obr. 18 – 4). Na vzorku musí být nanесena deformační síť (Obr. 18 – 3). Deformační sítě jsou většinou na vzorku elektrochemicky naleptány. Výstupy z měření jsou důležité pro zjištění vlastností materiálu, detekci oblastí s kritickou deformací a dají se optimalizovat nástroje pro tažení. [13] [15]



Obr. 18 Vzorek a deformační síť pro systém ARGUS [6]

Na Obr. 18 – 1 je viditelný tvářený díl vyhodnocovaný bezkontaktním měřicím systémem ARGUS. Na výlisku je nanесena deformační síť tvořena černými tečkami (detail vpravo dole), které mají před tvářením konstantní vzdálenost. Přístřih je snímán z několika míst před provedením operace a po dokončení tvářením. Vyhodnocení proběhne na základě difference rozměrů jednotlivých bodů na deformační síti. Měřicí systém je schopen rozeznat jednotlivé body před a po tvářením na základě kalibrace, která probíhá před měřením pomocí kalibračních kamenů. Díky tvaru kalibračního kamene a kalibračním značkám je měřicí systém schopen zaznamenat polohu a určit změnu na deformační síti ve stereografickém (3D) vidění. Proces není třeba sledovat kontinuálně, stačí pouze pořídit snímky vzorku před a po tvářením, toto není možné u měřicího systému ARAMIS, kde musí být proces tvářením viditelný po celou dobu měření. [13][15]

### 5.2.3 Měřicí systém PONTOS

Měřicí systém Pontos je dynamický měřicí systém umožňující měření kinematických veličin (posunutí, rychlost, zrychlení). Využití tohoto systému je hlavně v oblasti automobilového a leteckého průmyslu. Měřicí systém má dvě kamery synchronizované na zaznamenávání snímků ve stereo režimu. Pomocí těchto dvou kamer zaznamenáváme prostorové souřadnice sledovaného systému. Princip měření je založen na optické triangulaci, kdy je viditelný modulovaný bod promítán na cílovou plochu. Celý měřicí systém je umístěn před měřeným objektem a počet měřených bodů je neomezený a nezávislý na snímkovací frekvenci. Měřený objekt je označen optickými body (tzv. retro značky). Systém dvou kamer snímá tyto optické body a počítá prostorové souřadnice, posunutí a deformaci jednotlivých bodů. Měřicí systém PONTOS se používá hlavně k měření kinematických a kinetických veličin těles a soustav, k měření vibrací, tuhosti tělesa a dá se využít při měření stárnutí zahrnující viskoelastické elementy. V automobilovém a leteckém průmyslu se využívá k měření sekvenčních pohybů, dynamiky spár, přesazení a kmitání. [13] [16]



Obr. 19 Kalibrační kříž tzv. cross [18]

Kalibrace bezkontaktního měřicího systému PONTOS se provádí s pomocí tzv. kalibračního kříže (calibration cross). Kalibrační kříž je opatřen specifickými značkami s různou orientací (Obr. 19).



Obr. 20 Měřicí systém Pontos

Na Obr. 20 je bezkontaktní měřicí systém Pontos. Kamery snímají body umístěné na měřeném objektu (tzv. retro značky). Body umístěné na objektu nahrazují deformační síť, které jsou u systémů ARAMIS a ARGUS.

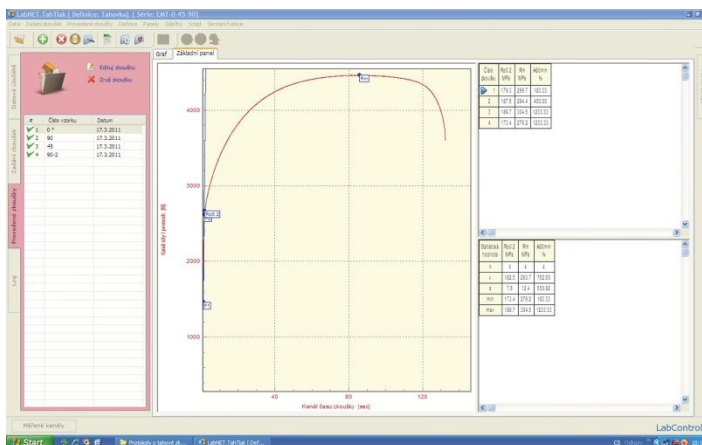
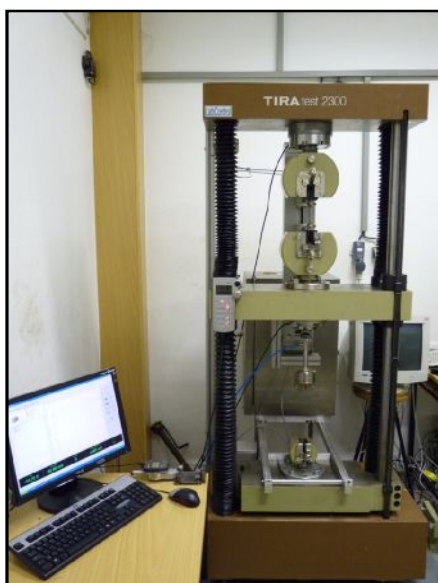


## 6 Experimentální část diplomové práce

Měření experimentální části diplomové práce proběhlo v laboratořích katedry strojírenské technologie. Měření probíhalo na trhačím zařízení TIRAtest 2300, současně byla tahová zkouška snímána bezkontaktním měřicím zařízením ARAMIS od německé firmy GOM. Naměřené hodnoty byly zpracovány ve výpočetní stanici v laboratořích katedry strojírenské technologie. Měřené hodnoty a cíle diplomové práce jsou popsány v kapitole 6.1.

### 6.1 Cíle diplomové práce

Hlavním cílem experimentální části diplomové práce bylo nalezení hodnot skutečného přetvoření ( $\varphi$ ) a napětí ( $\sigma$ ) v oblasti za mezí pevnosti testovaného materiálu a porovnání s hodnotami vypočtenými pomocí aproximací tahové zkoušky. V praxi mají tyto skutečné hodnoty přetvoření ( $\varphi$ ) a napětí ( $\sigma$ ) význam pro stanovení vlivu aproximace tahového diagramu na přesnost simulace tvářecího procesu v porovnání se skutečností. Předmětem této diplomové práce není provedení simulací tvářecího procesu se zadáním skutečných hodnot. Toto bude tématem dalšího výzkumu na katedře strojírenské technologie, ale hlavní cíl je pouze výpočet skutečných hodnot a jejich porovnání s aproximací pro vybrané materiály.



Obr. 21 Měřicí stroj TIRA test 2300 a pracovní prostor programu LabTest 4

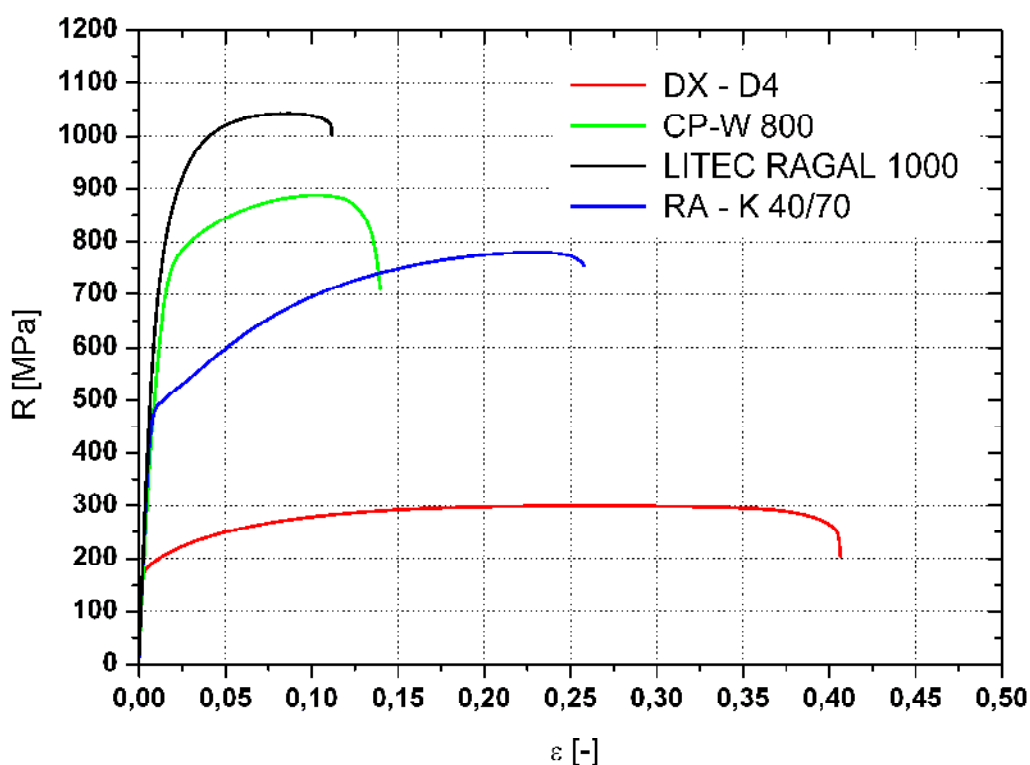
Měřicí stroj TIRAtest 2300 je na Obr. 21 vlevo. Na této fotografii je znázorněn trhačím stroj bez měřicího systému ARAMIS. Pracovní prostředí softwaru LabTest 4, který zaznamenává průběh tahové zkoušky, je na Obr. 21 vpravo.

## 7 Materiály použité pro měření

Pro měření v experimentální části byly použity vzorky plechů používané především v automobilovém průmyslu pro stavbu karoserie. Z celého rozsahu sortimentu automobilových plechů byly zvoleny různé druhy s odlišnými mechanickými vlastnostmi, tedy jak hlubokotažná ocel, tak vysokopevnostní ocel. Základní naměřené mechanické vlastnosti zvolených materiálů jsou uvedeny v Tab. 6. Na Obr. 22 jsou zobrazeny záznamy statické zkoušky tahem všech vzorků použitých v experimentální části. Detailnější charakteristiky jednotlivých materiálů jsou uvedeny v kapitole 3.

**Tab. 6** Základní mechanické vlastnosti zvolených materiálů

Materiál	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Modul monotóního zpevnění dle ČSN ISO 10275	Exponent deformačního zpevnění dle ČSN ISO 10275
	$R_m$	$R_{p0,2}$	$A_{80}$	C	n
	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[-]
EMT DX 54 - směr odebrání 0°	299,7	183,3	40,2	535,1	0,237
EMT DX 54 - směr odebrání 45°	304,5	189,7	36,6	536,6	0,226
EMT DX 54 - směr odebrání 90°	276,2	173,4	37,3	516,1	0,217
RA-K 40/70	780,0	390,6	24,4	1539,2	0,296
CPW 800	887,0	427,9	12,8	1539,2	0,296
LITEC RAGAL 1000	1043,4	560,0	10,3	1471,1	0,104



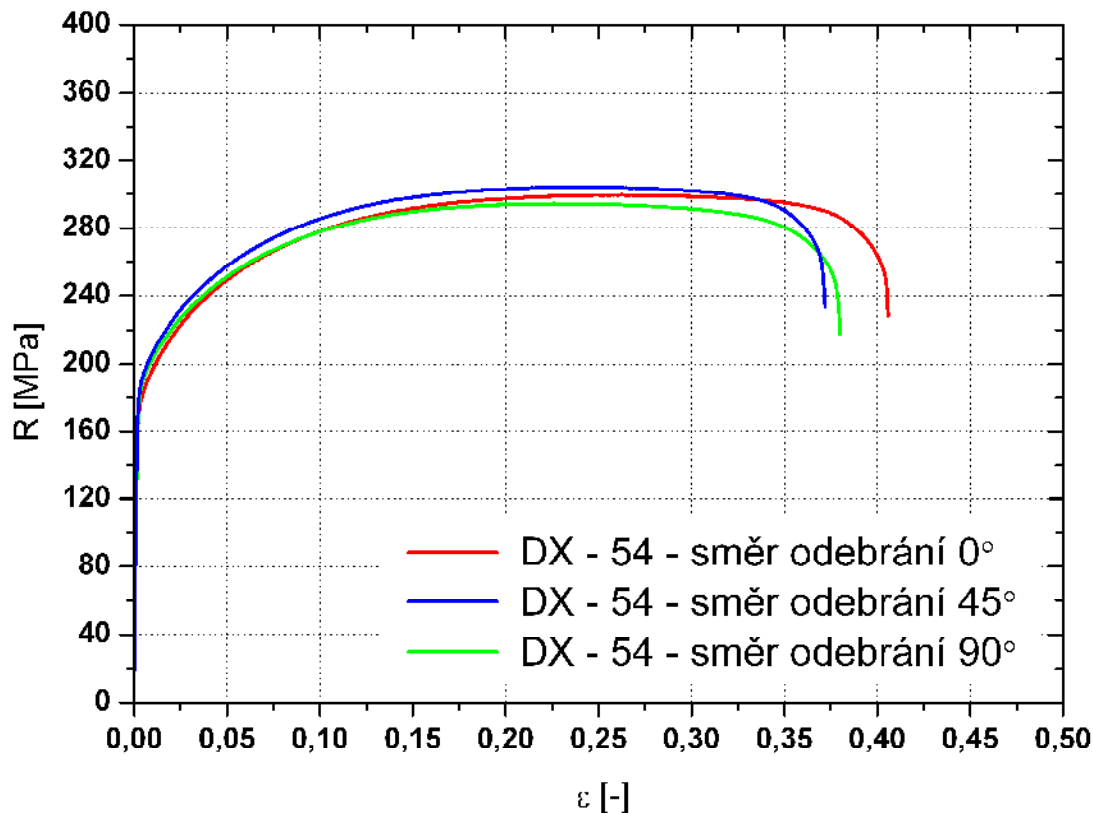
**Obr. 22** Záznamy ze statické zkoušky tahem – všechny měřené materiály

## 7.1 Materiál DX 54

Materiál DX 54 představuje jeden z nejběžnějších hlubokotažných ocelí. Patří do skupiny hlubokotažných plechů ukladných hliníkem mající ve struktuře velmi nízký obsah uhlíku. Díky výborné tvářitelnosti se používá pro tvarově velmi složité výlisky především pohledových dílů. Ke zvýšení pevnosti se tyto oceli legují P (tzv. nefosforizované oceli) nebo se mikrolegují Mn, Si, Al, V, Ti a dalšími prvky. Požívají se nejen v automobilovém a i leteckém průmyslu pro stavbu pohledových dílů. V Tab. 7 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti materiálu DX 54 a rozměry použitých vzorků. [3]

Tab. 7 Základní vlastnosti materiálu DX 54

Materiál	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Tloušťka vzorku	Šířka vzorku	Rychlost zatěžování
	$R_m$	$R_{p0,2}$	$A_{80}$	t	s	v
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]	[mm/min]
EMT DX 54-směr odebrání 0°	299,7	183,3	40,2	0,74	20,12	10
EMT DX 54 - směr odebrání 45°	304,5	189,7	36,6	0,74	20,12	10
EMT DX 54 - směr odebrání 90°	276,2	173,4	37,3	0,74	20,12	10



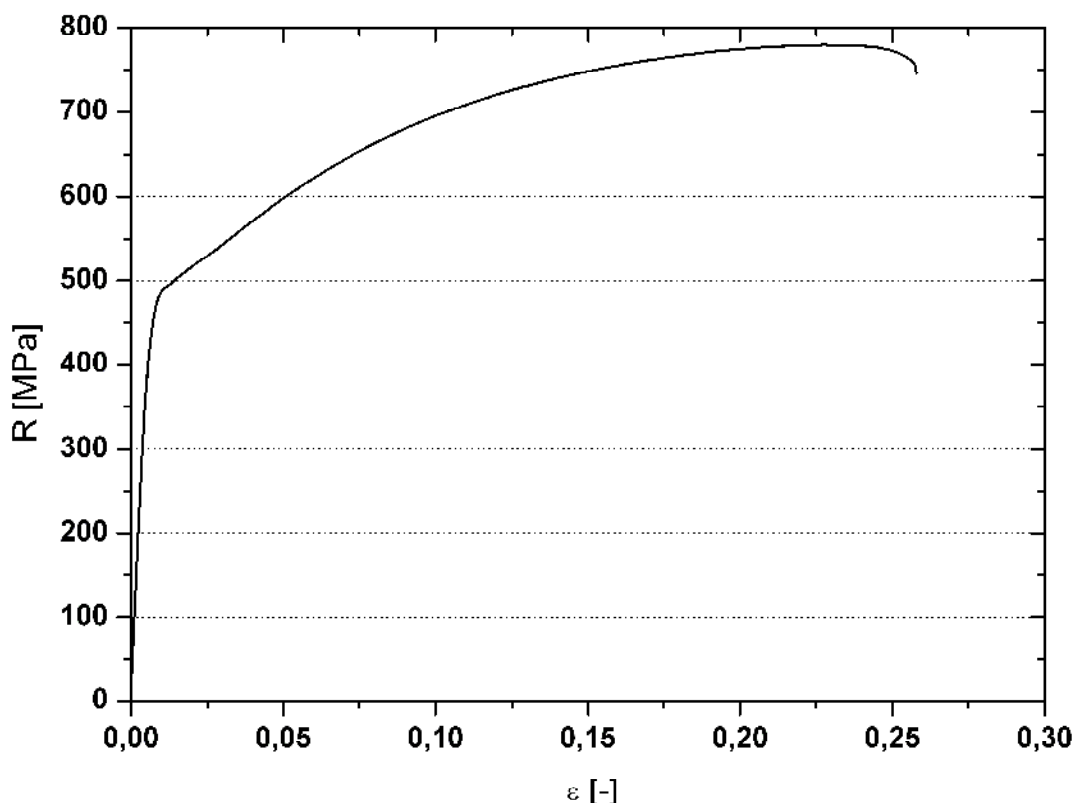
Obr. 23 Smluvní tahový diagram – materiál DX 54

## 7.2 Materiál RA-K 40/70

Materiál RA-K 40/70 je vyráběný německou firmou ThyssenKrupp a patří do řady materiálů RA-K (**RestAustenit Stahl**). Mez pevnosti se u tohoto materiálu pohybuje od 600 MPa do 1000 MPa dle chemického složení. Jedná se o pevnostní ocel s transformačně indukovanou plasticitou, tj. během tváření se transformuje austenit na martenzit. Materiál má pak vysokou schopnost absorpce energie a je vhodný na součásti v okolí deformačních zón. Obsahuje až 20% zbytkového austenitu a může obsahovat až 90% bainitu. RA-K 40/70 i přes své velmi vysoké hodnoty meze pevnosti ( $R_m \geq 700$  MPa) vykazuje dobré hodnoty tažnosti ( $A_{50mm} \geq 26\%$ ). Naměřené mechanické hodnoty zkušebních vzorků jsou uvedeny v Tab. 8 a viditelné ze smluvního tahového diagramu na Obr. 24. Materiál je vhodný pro vypínání a hluboké tažení za studena. Využívá se pro výrobu tvarově složitých součástí náročných na pevnost. [3]

**Tab. 8** Základní vlastnosti materiálu RA - K 40/70

Materiál	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Tloušťka vzorku	Šířka vzorku	Rychlost zatěžování
	$R_m$	$R_{p0,2}$	$A_{80}$	t	s	v
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]	[mm/min]
RA-K 40/70	780,0	390,6	24,4	1,48	16,4	10



**Obr. 24** Smluvní tahový diagram - materiál RA-K 40/70

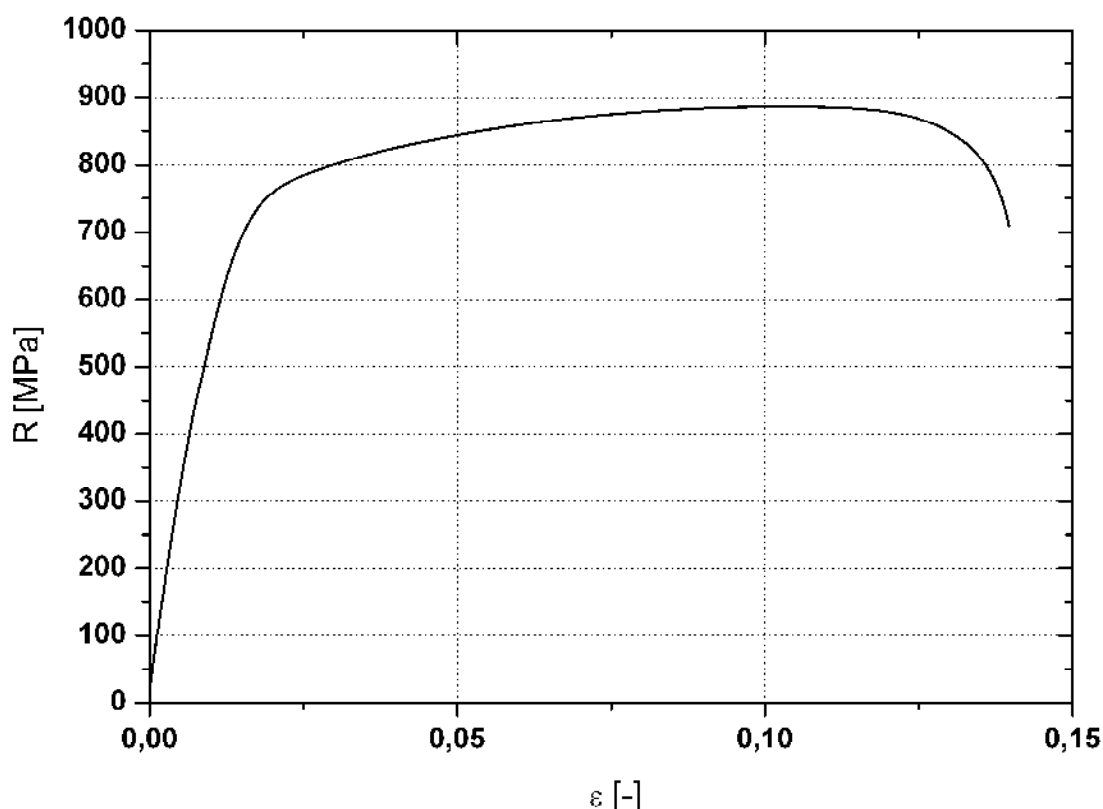


### 7.3 Materiál CP-W 800

Stejně jako předchozí materiál RA-K 40/70 je výrobce i tohoto materiálu (CP-W 800) německá firma ThyssenKrupp. Materiál CPW-800 je typickým zástupcem vícefázových ocelí označovaných jako CP (**C**omplex **P**hase) oceli. Mez pevnosti tohoto materiálu se pohybuje od 800 MPa do 1130 MPa. Ocel je válcovaná za tepla s termomechanickým doválcováním a následně žhána ke snížení vnitřního pnutí. Materiál CP-W 800 má velmi jemnou strukturu tvořenou feritem, bainitem a martenzitem, vykazuje BH efekt. Zvýšení meze pevnosti pomocí BH efektu může být až 70 MPa. Výhody tohoto materiálu jsou velká odolnost vůči opotřebení a dobrá svařitelnost. CP-W 800 se výhradně používá pro tváření za studena. Vzhledem k vysoké pevnosti, zaručené svařitelnosti a vysoké odolnosti vůči opotřebení je materiál vhodný pro vysoce namáhané díly v automobilovém a leteckém průmyslu. Mechanické vlastnosti naměřených vzorků jsou uvedeny v Tab. 9 a patrné z grafu na Obr. 23. [3]

**Tab. 9** Základní vlastnosti materiálu CP - W 800

Materiál	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	tloušťka vzorku	Šířka vzorku	Rychlost zatěžování
	$R_m$	$R_{p0,2}$	$A_{80}$	t	s	v
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]	[mm/min]
CP - W 800	887,0	427,9	12,8	2,05	16,41	10



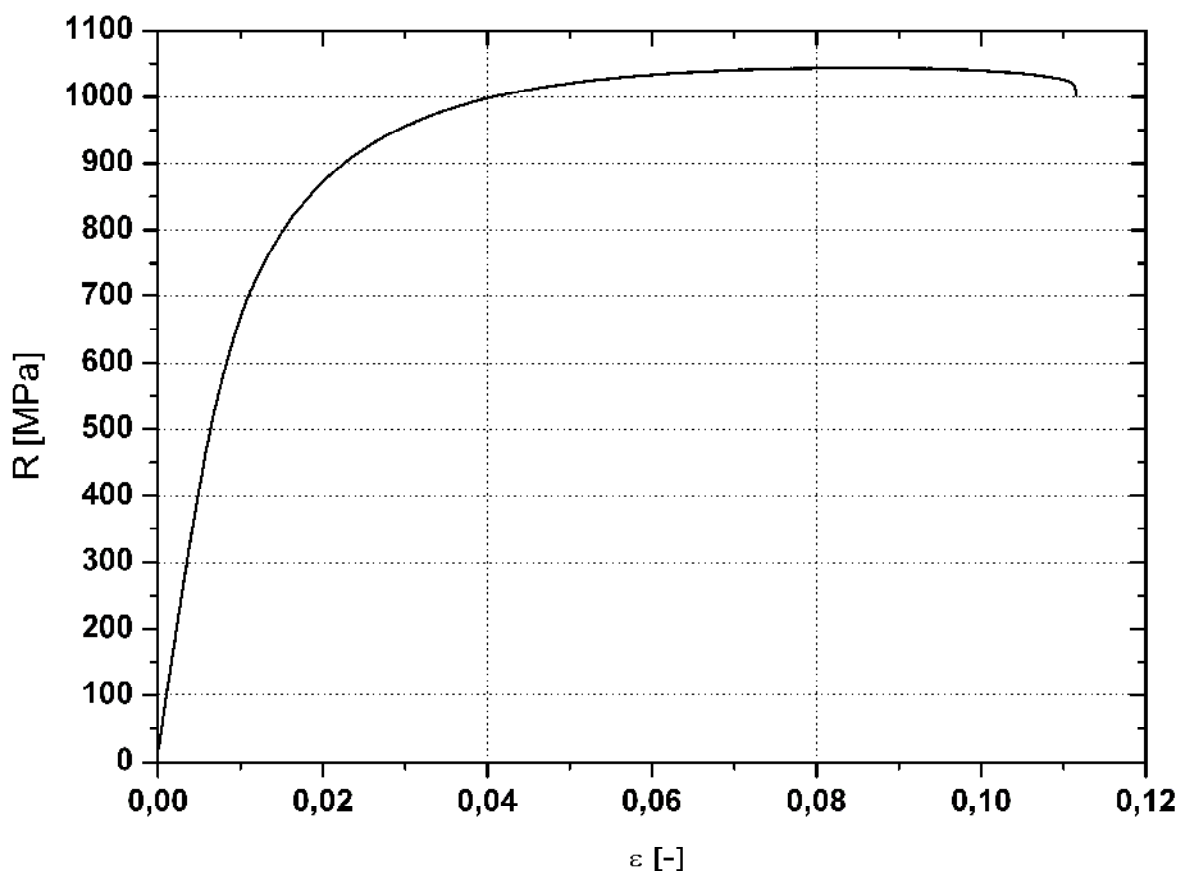
**Obr. 25** Smluvní tahový diagram - materiál CP-W 800

## 7.4 Materiál LITEC RAGAL 1000

Materiál LITEC RAGAL 1000 vyrábí finská firma RAUTARUUKKI. Patří mezi vysokopevnostní materiály, vyrábí se v několika pevnostních třídách od meze pevnosti 700 MPa do 1100 MPa s tažností od 6 do 14%. Jedná se o dvoufázovou ocel označovanou jako DP ocel (**D**ual **P**hase) určenou ke tváření za studena. Jeho struktura je tvořená martenzitem rozptýleným ve formě ostrůvků ve feritické matici. Vzhledem k jeho vlastnostem a vysoké pevnosti se materiál používá v automobilovém a leteckém průmyslu na vysoce namáhané díly. Na Obr. 26 je smluvní tahový diagram materiálu LITEC RAGAL 1000. Mechanické vlastnosti a rozměry materiálu jsou uvedeny v Tab.10.

**Tab. 10** Základní vlastnosti materiálu LITEC RAGAL 1000

Materiál	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost	Tloušťka vzorku	Šířka vzorku	Rychlost zatěžování
	$R_m$	$R_{p0,2}$	$A_{80}$	$t$	$s$	$v$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]	[mm/min]
LITEC RAGAL 1000	1043,4	560,0	10,3	1,27	13,35	10

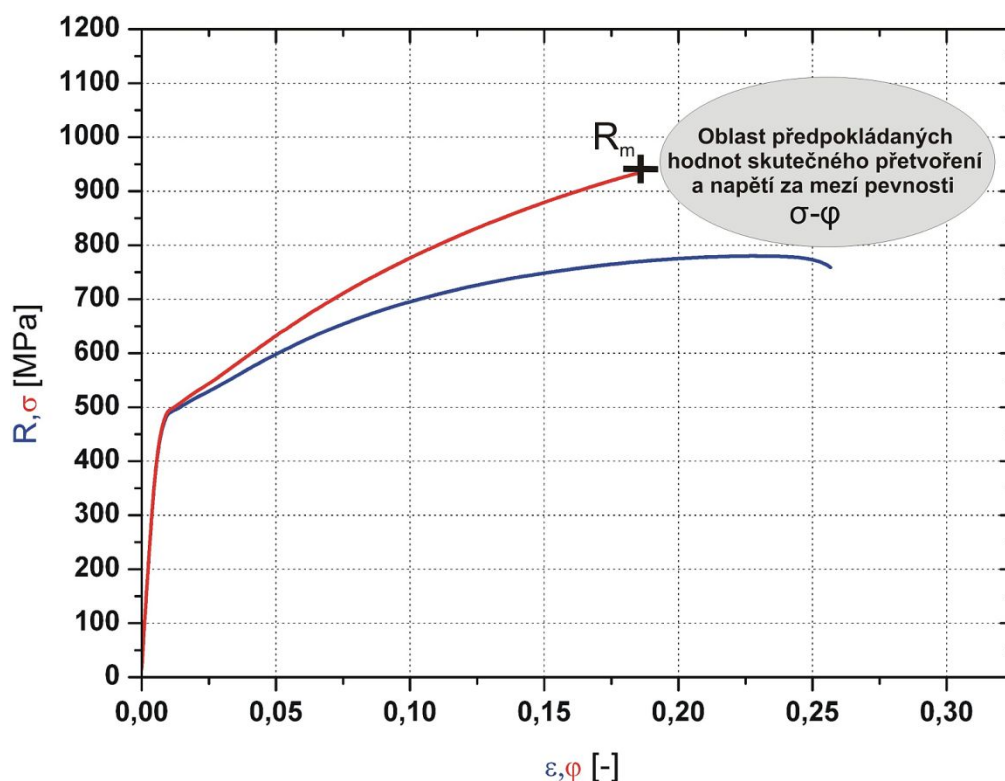


**Obr. 26** Smluvní tahový diagram - materiálu LITEC RAGAL 1000

## 8 Měření skutečných hodnot $\sigma - \varphi$ v oblasti za mezí pevnosti

Ke zjištění velikosti skutečných hodnot  $\sigma - \varphi$  v oblasti za mezí pevnosti byla provedena statická zkouška tahem na trhacím stroji TIRAtest 2300 pro materiály uvedené v předchozí kapitole. Současně s probíhající statickou zkouškou tahem bylo měření snímáno bezkontaktním optickým měřicím systémem ARAMIS od německé firmy GOM. Cílem těchto zkoušek bylo získat záznam tahových zkoušek optickým měřicím systémem od počátečního stavu materiálu do jeho porušení.

Na Obr. 27 je barevně smluvní a skutečný tahový diagram pro materiál RA-K 40/70 (modrou barvou je označen **smluvní tahový diagram** ( $R-\epsilon$ ) a červenou barvou je označen **skutečný tahový diagram** ( $\sigma-\varphi$ )). Skutečný tahový diagram končí na mezi pevnosti. Skutečné hodnoty přetvoření a deformace nejsou za mezí pevnosti známy z důvodu nestabilního procesu tváření. Tahový diagram se proto aproximuje pouze do meze pevnosti  $R_m$  (za mezí pevnosti jsou pak do aproximace dosazovány hodnoty až do přetvoření  $\varphi = 1$  dle vztahu  $\sigma = C \cdot \varphi^n$ ). Aby bylo možné spočítat skutečné hodnoty, musíme znát zatěžující sílu  $F$ , okamžitý průřez  $S$  a přetvoření  $\varphi$ . Tyto hodnoty byly získány pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS.

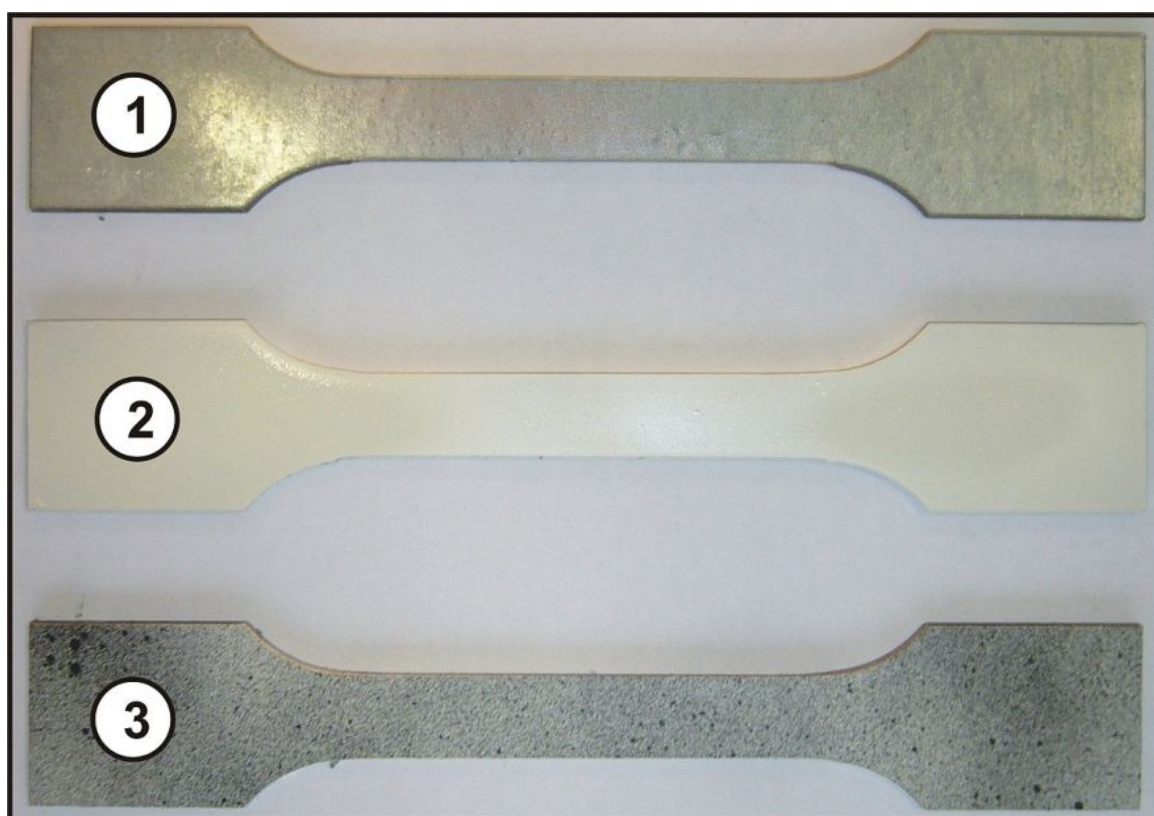


Obr. 27 Smluvní a skutečný tahový diagram – materiál RA-K 40/70

## 8.1 Nanesení deformační sítě na měřené vzorky

Před provedením tahové zkoušky a měřením optickým systémem ARAMIS bylo nezbytné nanést na zkušební vzorky speciální deformační síť tzv. pattern.

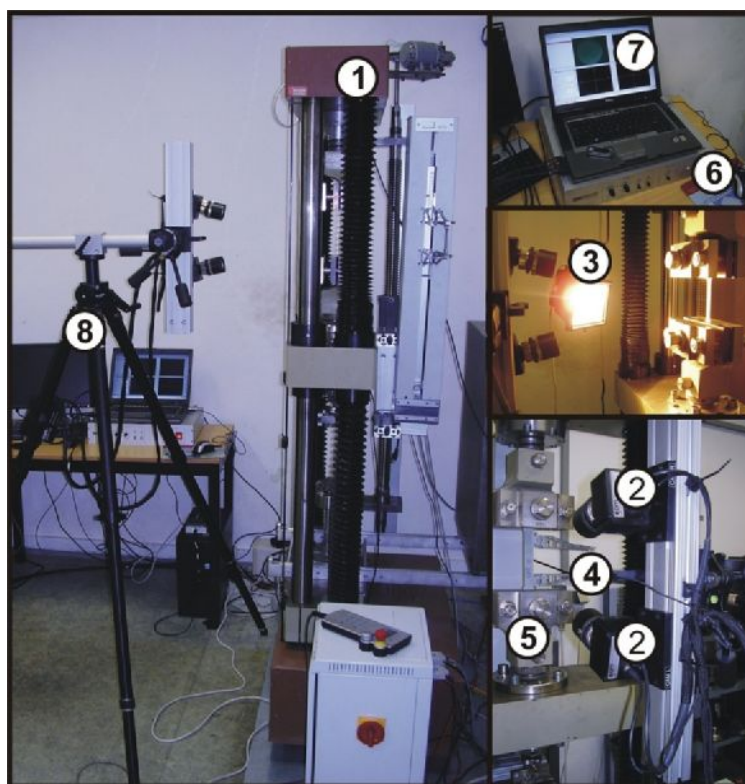
Postup nanesení deformační sítě (patternu) je znázorněn pomocí Obr. 28. V prvním kroku (1) jsme očistili a odmastili zkušební vzorek. Následně (2) jsme nastříkali na vzorek bílou barvu v souvislé vrstvě tak, aby neprosvítala barva základního materiálu, ale aby vrstva bílé barvy nebyla příliš tlustá. Poslední úprava (3) spočívala v nástřiku černé barvy a vytvoření černobílého stochastického povrchu vzorku (tzv. patternu). Deformační síť nesměla být příliš světlá, nebo tmavá a nesměla obsahovat velké černé, nebo naopak bílé plochy. Deformační síť byla nanesena na vzorek pouze z jedné strany.



**Obr. 28** Postup nanášení stochastické deformační sítě pro měřicí systém ARAMIS

## 8.2 Měření statické zkoušky tahem optickým systémem ARAMIS

Měření probíhalo v laboratoři tribologie na Katedře strojírenské technologie TUL. Pomocí trhacího stroje TIRAtest 2300 jsme provedli statickou zkoušku tahem pro předem vybrané vzorky. Statickou zkoušku tahem zároveň snímal bezkontaktní měřicí systém ARAMIS. Záznam z tahové zkoušky byl přes měřicí tenzometrickou hlavici zpracováván softwarem LabTest 4, optický měřicí systém ARAMIS snímal průběh zkoušky dle nastavené frekvence snímání. Snímky byly ukládány přes řídicí trigger do PC s příslušným softwarem (průběh zkoušky byl následně vyhodnocen na výpočetní stanici, uspořádání měřicího pracoviště je vidět na Obr. 29).



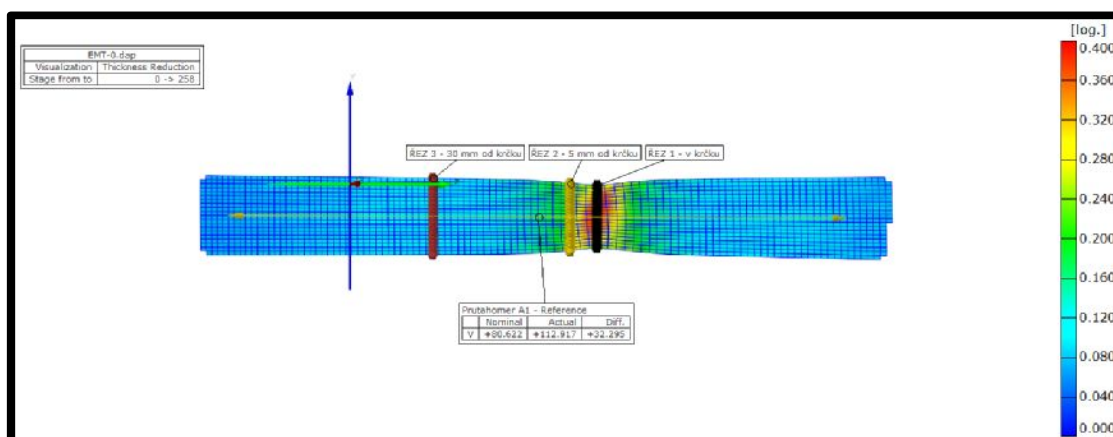
**Obr. 29** Uspořádání pracoviště, trhací stroj TIRAtest 2300 a měřicí systémy ARAMIS

Na Obr. 29 je pod číslem 1 zobrazen trhací stroj TIRA test 2300. Číslem 2 jsou označeny snímací kamery optického systému ARAMIS s rozlišením 2 MB. Kamery byly před měřením kalibrovány kalibrační destičkou na příslušnou vzdálenost od měřeného vzorku. Přídavné osvětlení označeno číslem 3. Číslo 4 na pravé dolní fotografii znázorňuje zkoušený vzorek s nanesenou specifickou deformační sítí (tzv. pattern), číslo 5 čelisti trhacího stroje. PC s řídicím triggerem pro záznam dat z optického měřicího systému jsou zobrazeny na pravé horní fotografii (6,7). Notebook s řídicím triggerem jsou označeny číslem 6, 7. Stativ s dvojicí snímacích kamer je označen číslem 8.



### 8.3 Vyhodnocení zkoušky tahem měřícím systémem ARAMIS

Z časových důvodů se data přenesla do výpočetní stanice. Z tahové zkoušky se vyhodnotily potřebné mechanické vlastnosti měřených materiálů. U vzorků byly zjištěny meze pevnosti a podle dat měřicího systému ARAMIS odpovídající okamžik, kdy došlo k překročení meze pevnosti. V úseku mezi mezí pevnosti a porušením vzorku bylo zvoleno deset bodů pro určení skutečného napětí ( $\sigma$ ) a přetvoření ( $\varphi$ ). Pro naměření těchto hodnot jsme na vzorku zvolili tři místa - oblast krčku, 5 mm od krčku a 30 mm od krčku.



**Obr. 30** Zkušební vzorek materiálu DX 54 ve směru  $0^\circ$  se zavedenými řezy

Na vzorky byly v programu ARAMIS zavedeny souřadné systémy a řezy ve zvolených místech (krček, 5 mm od krčku a 30 mm od krčku). Obr. 30 ukazuje vzorek materiálu DX 54 (směr odebrání  $0^\circ$ ) včetně zavedených řezů, řez č. 1 (černou barvou) v oblasti krčku, řez č. 2 (žlutá barva) ve vzdálenosti 5 mm od krčku, řez č. 3 (červená barva) ve vzdálenosti 30 mm od krčku. Výpočty skutečných přetvoření ( $\varphi$ ) ve zkušebním vzorku vycházejí ze zákona nestlačitelnosti (při deformaci nedochází ke změně objemu) uvedený ve vztahu 25. Přetvoření v podélné ose vzorku je označena jako  $\varphi_1$  a bezkontaktní měřicí systém ARAMIS značí tuto deformaci jako **major strain** (hlavní napětí). Přetvoření  $\varphi_2$  označuje měřicí systém ARAMIS jako **minor strain**. Poslední složku přetvoření  $\varphi_3$  ve směru tloušťky materiálu (změna tloušťky) označuje systém ARAMIS redukce ve směru tloušťky **thickness reduction**. Vzhledem k tomuto značení bude přetvoření ve směru tloušťky materiálu označeno jako  $\varphi_3$  a v diagramech z měřicího systému ARAMIS jako **thickness reduction**. Prodloužení v podélném směru bude označeno jako  $\varphi_1$  a v diagramech z měřicího systému ARAMIS jako **major strain**.

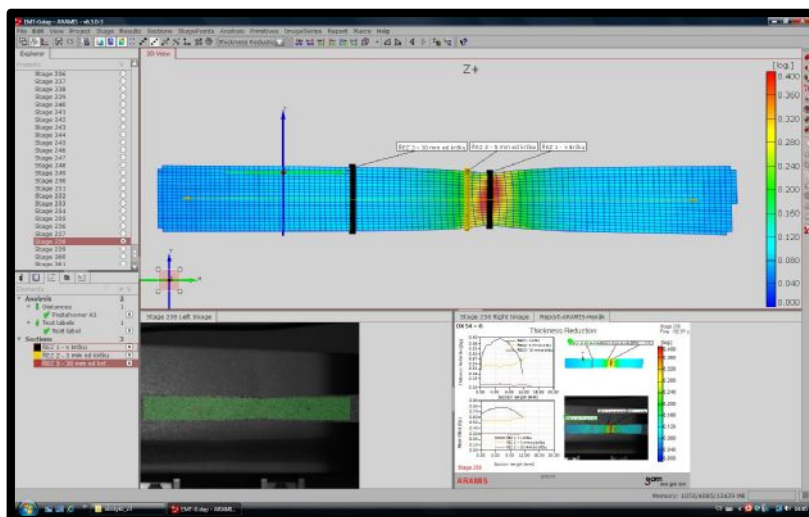
**Zákon nestlačitelnosti** (zákon zachování objemu):

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (25)$$

Kde:

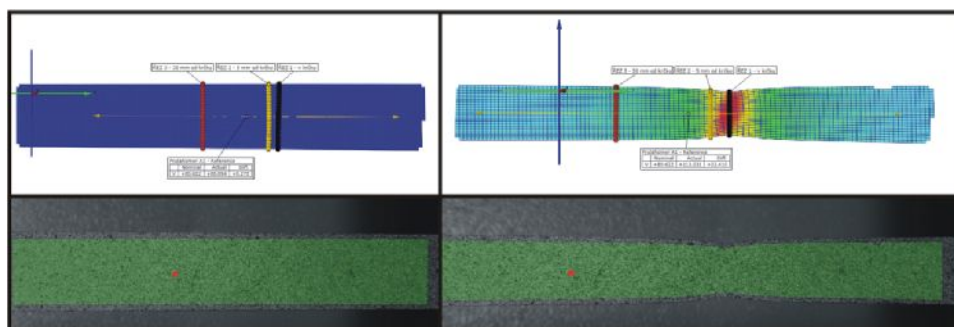
$\varphi_1$	- přetvoření v podélném směru	[-]
$\varphi_2$	- přetvoření ve směru šířky	[-]
$\varphi_3$	- přetvoření ve směru tloušťky	[-]

Obr. 31 ukazuje pracovní prostor výpočetního programu bezkontaktního měřicího systému ARAMIS. Nahoře je zkušební tyčka těsně před přetržením se zavedenými označenými řezy. Vlevo dole je fotografie reálného zkušební vzorku a vpravo je průběh přetvoření ve směru  $\varphi_3$ . Průběh  $\varphi_3$  je na Obr. 31 znázorněn jako kladný. Ve skutečnosti je však záporný (zkušební vzorek se zužuje).



**Obr. 31** Pracovní prostor programu ARAMIS

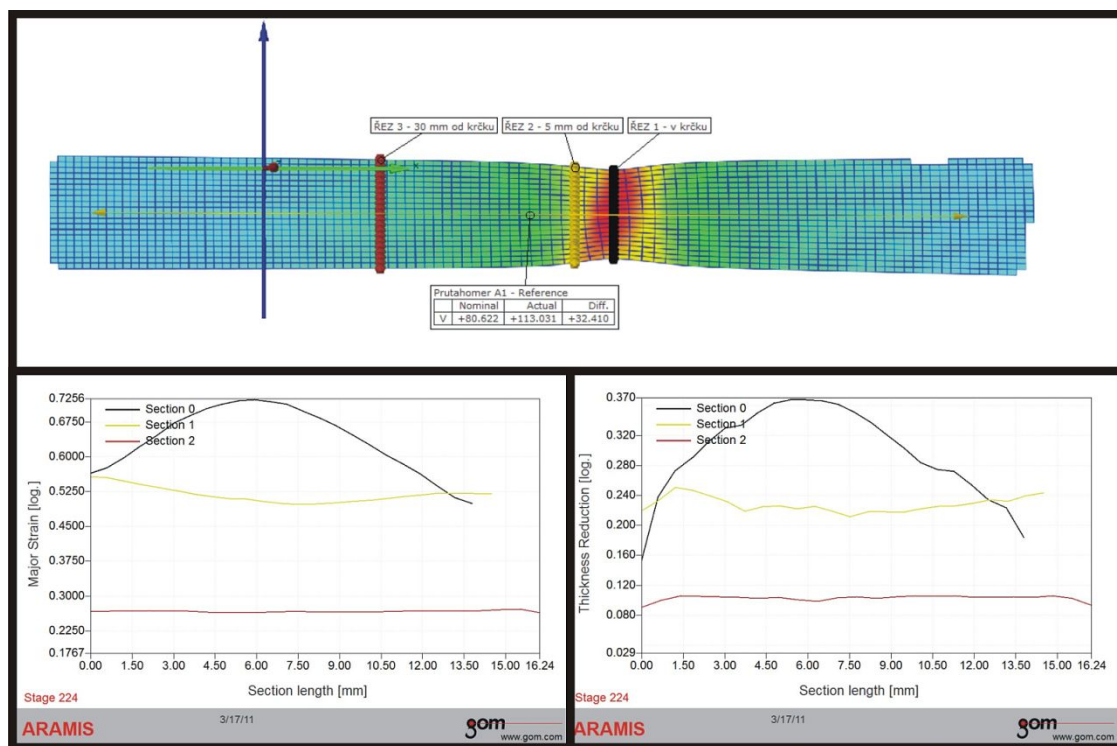
Na Obr. 32 jsou záběry z programu ARAMIS. Horní obrázky znázorňují rozložení hlavního přetvoření  $\varphi_1$  na začátku tahové zkoušky (vlevo) a těsně před přetržením (vpravo). Spodní reálné snímky vzorků pro příslušné napětí jsou opatřené tzv. maskou tedy oblast označenou zeleně, maska byla nastavena před výpočtem a systém ARAMIS zpracovává pouze tuto oblast.



**Obr. 32** Vyhodnocení v programu ARAMIS – mat. DX 54 (směr odebrání 45°)

## 8.4 Výpočet skutečného napětí ( $\sigma$ ) a přetvoření ( $\varphi$ ) za mezí pevnosti

K výpočtu skutečného přetvoření ( $\varphi$ ) v oblasti za mezí pevnosti bylo třeba zjistit okamžitý průřez  $S$ , sílu  $F$  a přetvoření ve směru  $\varphi_3$  v každém ze zvolených okamžiků za mezí pevnosti. Pro každý měřený vzorek bylo za mezí pevnosti zvoleno deset bodů, ve kterých byla vypočítána skutečná hodnota napětí ( $\sigma$ ) a přetvoření ( $\varphi$ ). Tyto pak byly vyneseny ve skutečném diagramu  $\sigma - \varphi$ . Dále byla provedena aproximace skutečného tahového diagramu dle ČSN ISO 10275 a EN 10130, k deseti vypočteným hodnotám skutečného napětí a přetvoření byly vyneseny do grafu i příslušné aproximované hodnoty. Z tohoto grafu je pak zřetelná odchylka mezi skutečnou a aproximovanou hodnotou napětí ( $\sigma$ ) a přetvoření ( $\varphi$ ). Aby bylo možné spočítat tyto hodnoty, bylo nutné z programu ARAMIS vyexportovat hodnoty hlavního přetvoření  $\varphi_1$  a hodnoty vedlejšího přetvoření  $\varphi_3$ .



Obr. 33 Grafy přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_3$  – materiál DX 54 (směr odebrání  $45^\circ$ )

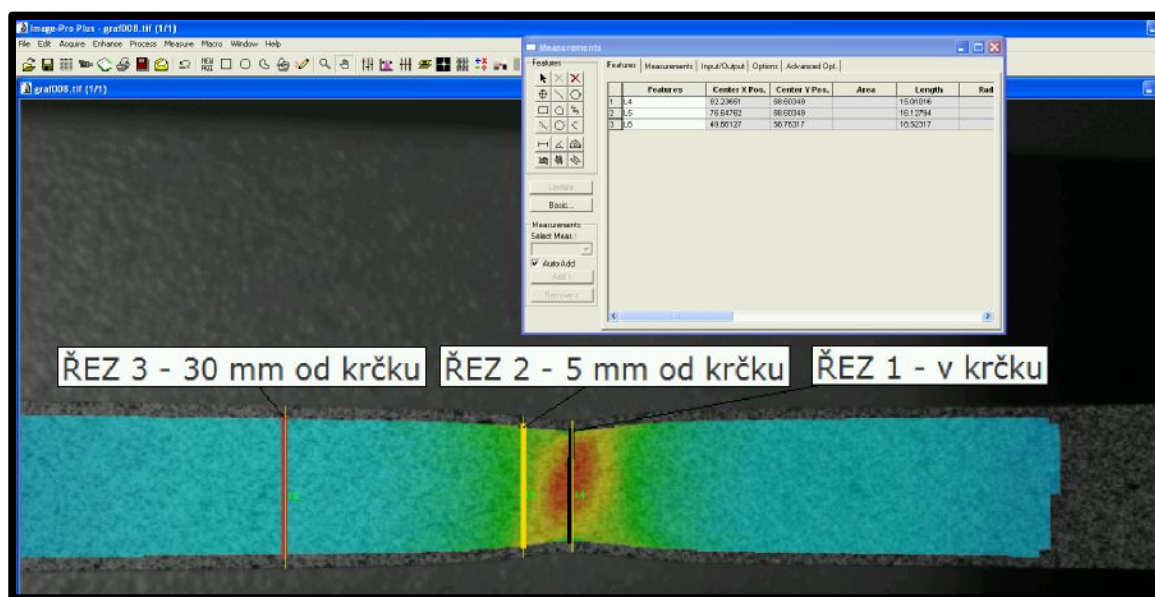
Snímek na Obr. 33 znázorňuje rozložení vedlejšího přetvoření  $\varphi_3$  na vzorku materiálu DX 54 (směr odebrání  $45^\circ$ ). Vlevo dole je znázorněn v grafu průběh hlavního přetvoření ve směru  $\varphi_1$  ve všech řezech (černě krček, žlutě 5 mm od krčku a červeně 30 mm od krčku). Pravý graf ukazuje průběh vedlejšího přetvoření ve směru  $\varphi_3$ . Průběh hlavního přetvoření  $\varphi_1$  a vedlejšího přetvoření  $\varphi_3$  jsou znázorněny kladně, ve skutečnosti je hlavní přetvoření  $\varphi_1$  kladné (vzorek se prodlužuje) a vedlejší přetvoření  $\varphi_3$  záporné (vzorek se ztenčuje).



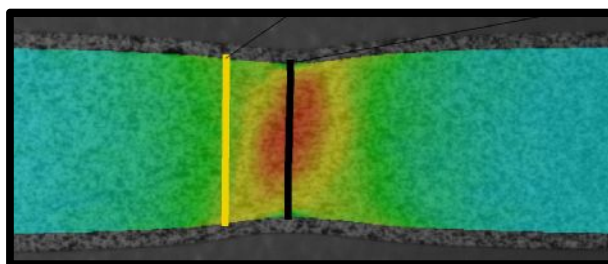
#### 8.4.1 Výpočet okamžité šířky vzorku b

Měřicí optický systém ARAMIS zaznamenává snímky z průběhu statické zkoušky tahem. Ve zvolených bodech pro výpočet okamžitého přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  jsou z fotografií pořízených měřicím systémem ARAMIS změřeny okamžité šířky zkušebních vzorků. Vzhledem k rozlišení snímků a velikosti jednotlivých fazet rozeznávaných měřicím systémem na jednotlivých snímcích není schopen bezkontaktní měřicí systém ARAMIS přesně rozlišit hranu zkušebního vzorku (viz Obr. 35, kraj měřeného objektu je vzdálen cca. 1 mm od skutečného okraje vzorku). Měřit okamžitou šířku vzorku pomocí měřicího systému ARAMIS nešlo. Pro vyhodnocení okamžité šířky byl tedy použit program ImagePro PLUS.

Pro každý vzorek proběhla kalibrace dle původní šířky vzorku před tvářením. Následně proběhlo měření okamžité šířky pro každý měřený okamžik ve všech řezech. Snímky byly exportovány v každém zvoleném okamžiku z měřicího zařízení ARAMIS v odpovídajícím rozlišení, aby přesnost měření byla odpovídající požadovaným podmínkám. Na Obr. 34 je zobrazen pracovní prostor programu ImagePro PLUS.



Obr. 34 Pracovní plocha programu Image Pro Plus pro měření okamžité šířky vzorku



Obr. 35 Detail kraje zkušebního vzorku zpracovaného měřicím systémem ARAMIS

#### 8.4.2 Výpočet okamžité tloušťky vzorku $t$

Podle přetvoření  $\varphi_3$  ve směru vedených řezů bylo možné vypočítat okamžitou tloušťku  $t$  zkušebního vzorku. Tloušťka vzorku před statickou zkouškou tahem  $t_0$  byla známá a okamžitou tloušťku  $t$  lze spočítat podle odvozeného vzorce (32). Hodnoty vedlejšího přetvoření  $\varphi_3$  pro jednotlivé vzorky byly vyexportovány z programu ARAMIS pro všechny zvolené řezy po celé jejich délce.

Odvození výpočtu okamžité tloušťky vzorku

**Pro přetvoření ve směru tloušťky  $\varphi_3$  platí vztah:**

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) [-] \quad (26)$$

Kde:  $\varphi_3$  - redukce ve směru tloušťky [-]  
 $t$  - okamžitá tloušťka [mm]  
 $t_0$  - původní tloušťka [mm]

**Okamžitá tloušťka  $t$  lze následně spočítat dle vztahu (27)**

$$t = t_0 - \Delta t [mm] \quad (27)$$

$$\Delta t = t_0 - t [mm] \quad (28)$$

Kde:  $\Delta t$  - změna tloušťky [mm]

Dosazením (27) do (26) získáme (29)

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{t_0 - \Delta t}{t_0}\right) = \ln\left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right) [-] \quad (29)$$

Po zlogaritmování:

$$e^{\varphi_3} = 1 - \frac{\Delta t}{t_0} [-] \quad (30)$$

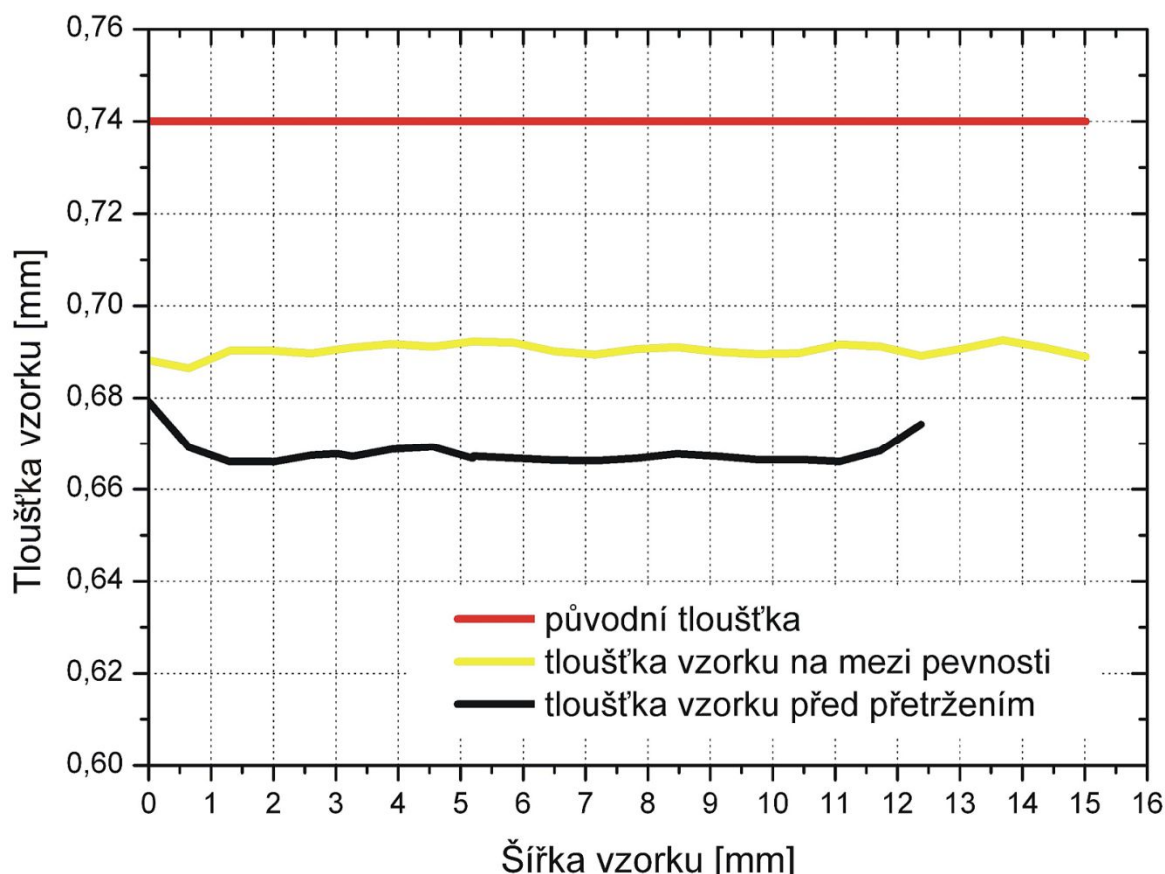
**Tedy platí:**

$$\Delta t = -t_0 \cdot (e^{\varphi_3} - 1) [mm] \quad (31)$$

**Okamžitou tloušťku  $t$  dostaneme dosazením (28) do (31)**

$$t = t_0 + t_0 \cdot (e^{\varphi_3} - 1) [mm] \quad (32)$$

Na Obr. 36 je v grafu zobrazená (červeně) původní tloušťka měřeného vzorku (v krčku) materiálu DX 54 (směr odebrání 45°). Žlutou barvou je okamžitá tloušťka zkušebního vzorku na mezi pevnosti (v krčku) a černě je označena okamžitá tloušťka těsně před porušením zkušebního vzorku (v krčku). Z grafu je zřetelná redukce tloušťky ( $t$ ) v závislosti na probíhající tahové zkoušce. Okamžitá tloušťka byla vypočítána pro všechny zvolené hodnoty ve všech řezech.



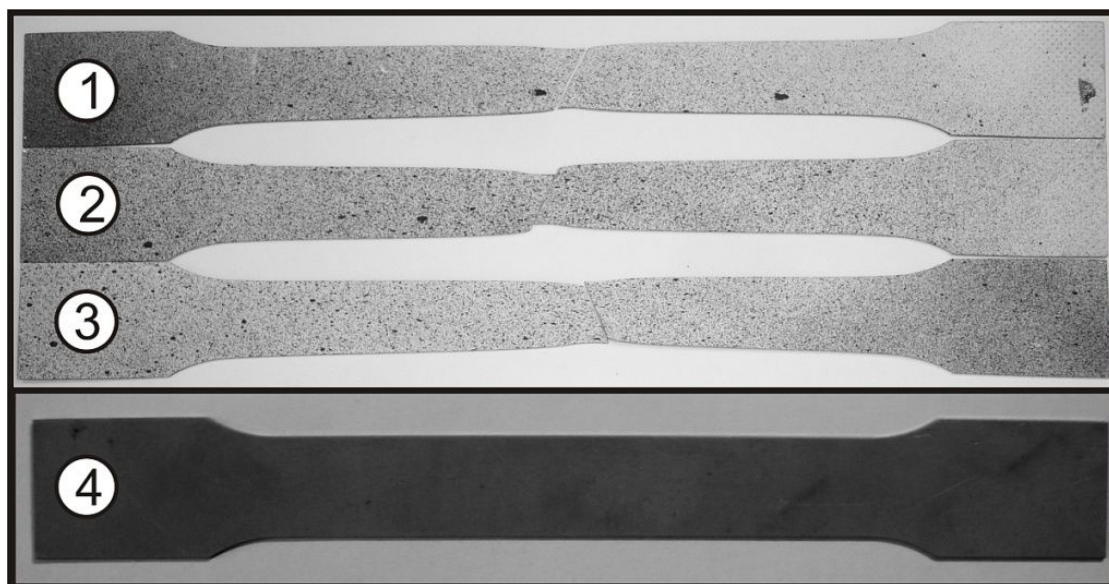
Obr. 36 Redukce tloušťky -materiál DX 54 (směr odebrání 45°)

## 9 Výsledky měření a výpočtů

V experimentální části proběhlo měření čtyř druhů materiálů celkem na devíti vzorcích. Tři vzorky pro hlubokotažný materiál DX 54 (směr odebrání  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ ) a dva vzorky pro materiály RA-K 40/70, CP-W 800 a LITEC RAGAL 1000. Měření a pomocné výpočty mechanických vlastností a rozměrů probíhaly pomocí bezkontaktního měřicího systému ARAMIS, programu Lab Test 4 a ImagePro PLUS. Finální výpočty byly (včetně grafů) provedeny v programu Origin Pro 7.5 (tabulky, některé pomocné výpočty a grafy byly provedeny v programu Excel). Výsledky pro všechny materiály jsou uvedeny v následujících kapitolách.

### 9.1 Výsledky měření – materiál DX 54

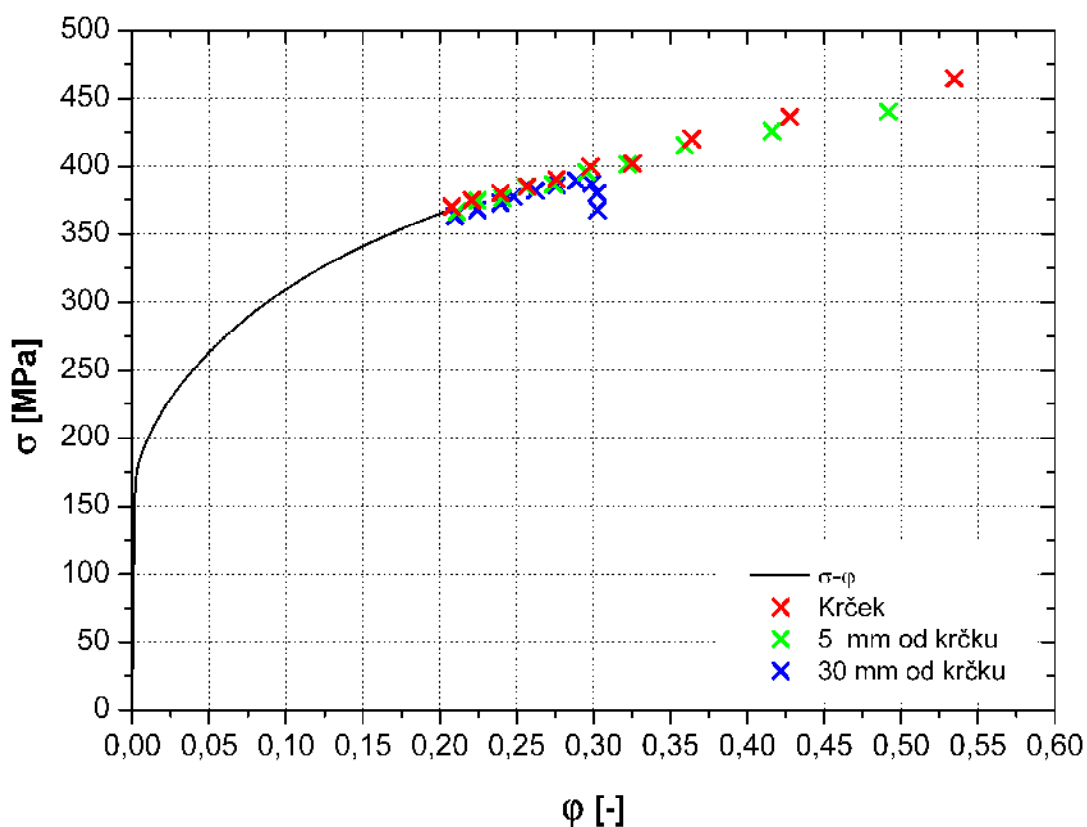
Vzorky hlubokotažného materiál DX 54 byly měřeny ve 3 směrech odebrání ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ), aby byla zohledněna anizotropie materiálu. Výsledky měření budou mít v rámci dalšího výzkumu na katedře u tohoto materiálu důležitý význam v závislosti na simulaci tvářecího procesu, který bude proveden s teoretickými hodnotami aproximovanými dle norem (ČŠN ISO 10275 a EN 10130) a s hodnotami  $\sigma$ ,  $\varphi$  vypočtenými v této práci. Na Obr. 37 jsou použité zkušební vzorky (1, 2, 3 ve směrech odebrání  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) s nanesenou deformační sítí (patternem). Vzorek 4 je původní, bez naneseného patternu.



Obr. 37 Vzorky materiálu DX 54 před a po přetržení

### 9.1.1 Materiál DX 54 (směr odebrání 0°)

V tahovém diagramu na Obr. 38 je černou barvou zobrazen grafický výsledek provedeného měření pro materiál DX 54 (směr odebrání 0°). Diagram  $\sigma$ - $\phi$  končí na mezi pevnosti  $R_m$ . Červenými body je znázorněno skutečné přetvoření a skutečné napětí v oblasti krčku, zeleně pak přetvoření a napětí ve vzdálenosti 5 mm od krčku a modře 30 mm od krčku. Aby bylo možné porovnat vyčítané (skutečné) hodnoty s teoretickými hodnotami, bylo třeba provést aproximaci zkoušky tahem. Aproximované hodnoty (teoretické) byly pak porovnány se skutečnými. Z tahového diagramu je zřetelná lokalizace napětí a přetvoření, která výrazně klesají s rostoucí vzdáleností od krčku v závislosti na velikosti přetvoření.



**Obr. 38** Skutečný tahový diagram - materiál DX 54 (směr odebrání 0°)

#### Aproximované (ČSN ISO 10275) a naměřené hodnoty tahového diagramu

Tato aproximace se dle výše uvedené normy provádí od přetvoření  $\phi = 0,05$  do oblasti meze pevnosti. Tahový diagram  $\sigma$ - $\phi$  je aproximován dle vztahu 24. Aproximace byla provedena pro skutečný tahový diagram  $\sigma - \phi$  a porovnání se skutečnými hodnotami pouze pro oblast krčku, v oblastech dále od krčku pro nás nemá význam právě z důvodu lokalizace přetvoření.

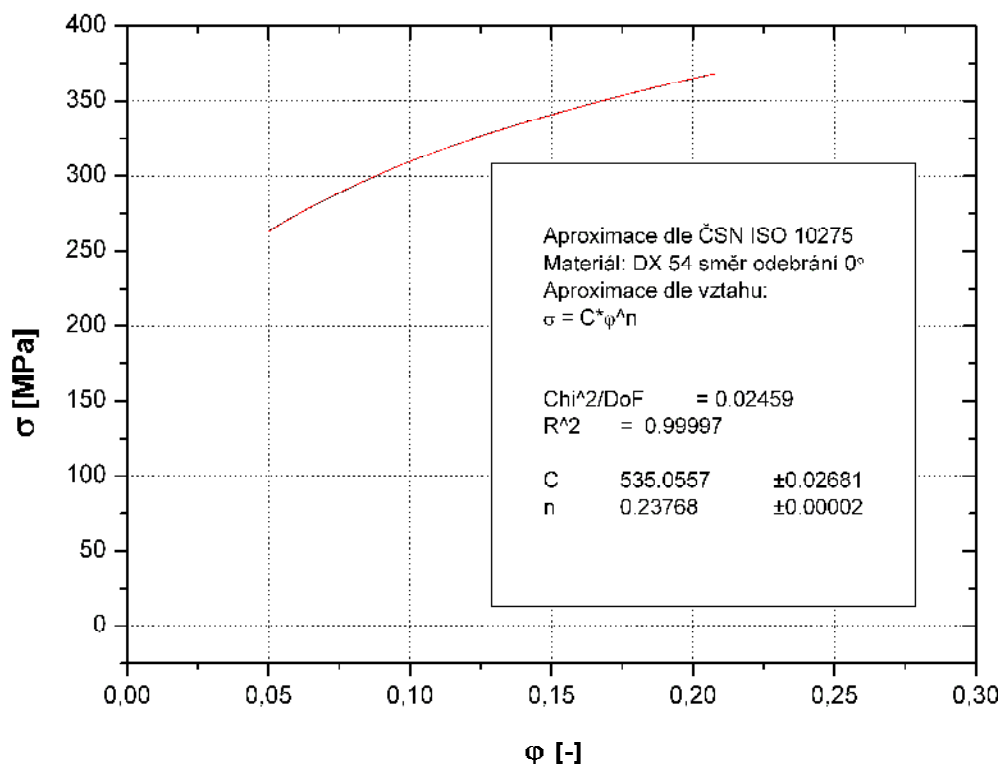
$$\sigma = C \cdot \phi^n [\text{MPa}] \quad (24)$$

V Tab. 11 jsou hodnoty modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  pro materiál DX 54 (směr odebrání  $0^\circ$ ) vypočtené aproximací dle ČSN ISO 10275 a také dle EN 10130. Rozdíly hodnot skutečných a hodnot aproximovaných v závislosti na způsobu aproximace jsou téměř zanedbatelné. Lze tedy říci, že způsob aproximace zásadně neovlivní výsledek měření.

**Tab. 11** Porovnání modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  - materiál DX 54 (směr odebrání  $0^\circ$ )

Materiál	ČSN ISO 10275	ČSN ISO 10275	EN 10 130	EN 10 130
	$C$ [MPa]	$n$ [-]	$C$ [MPa]	$n$ [-]
DX 54 - směr odebrání $0^\circ$	535,06	0,238	534,25	0,237

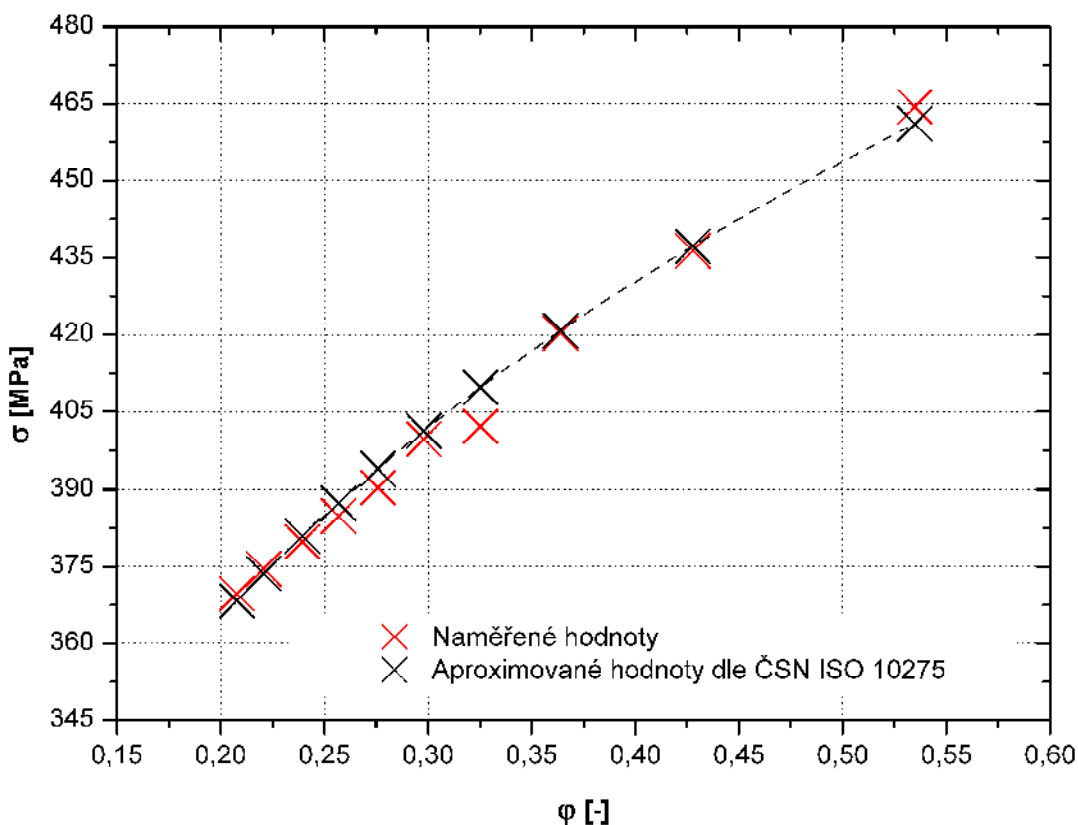
Graf aproximace tahové zkoušky na Obr. 39 pro materiál DX 54 (směr odebrání  $0^\circ$ ) byl vytvořen pomocí programu OriginPro Plus 7.5, skutečný tahový diagram byl vytvořený také v programu OriginPro Plus 7.5 z hodnot vyexportovaných bezkontaktním měřicím systémem ARAMIS. Průběh aproximace dle ČSN ISO 10275 je uveden z důvodu velkého rozsahu této práce pouze pro materiál DX 54 (směr odebrání  $0^\circ$ ), u ostatních materiálů včetně tohoto jsou vypočtené hodnoty modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  uvedeny v příslušné tabulce.



**Obr. 39** Aproximace dle ČSN ISO 10275 – mat. DX 54 (směr odebrání  $0^\circ$ )



Graf na Obr. 40 zobrazuje rozdíl mezi aproximovanými a naměřenými hodnotami přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$ . Černou barvou jsou označené hodnoty přetvoření a napětí vypočítané aproximací dle ČSN 10275. Černá čárkovaná čára označuje aproximovanou křivku tahového diagramu, která pokračuje za mezí pevnosti. Červenou barvou jsou označené skutečné hodnoty přetvoření naměřené a vypočítané pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS. Z grafu jsou vidět téměř totožné hodnoty **skutečných** a **aproximovaných** hodnot.

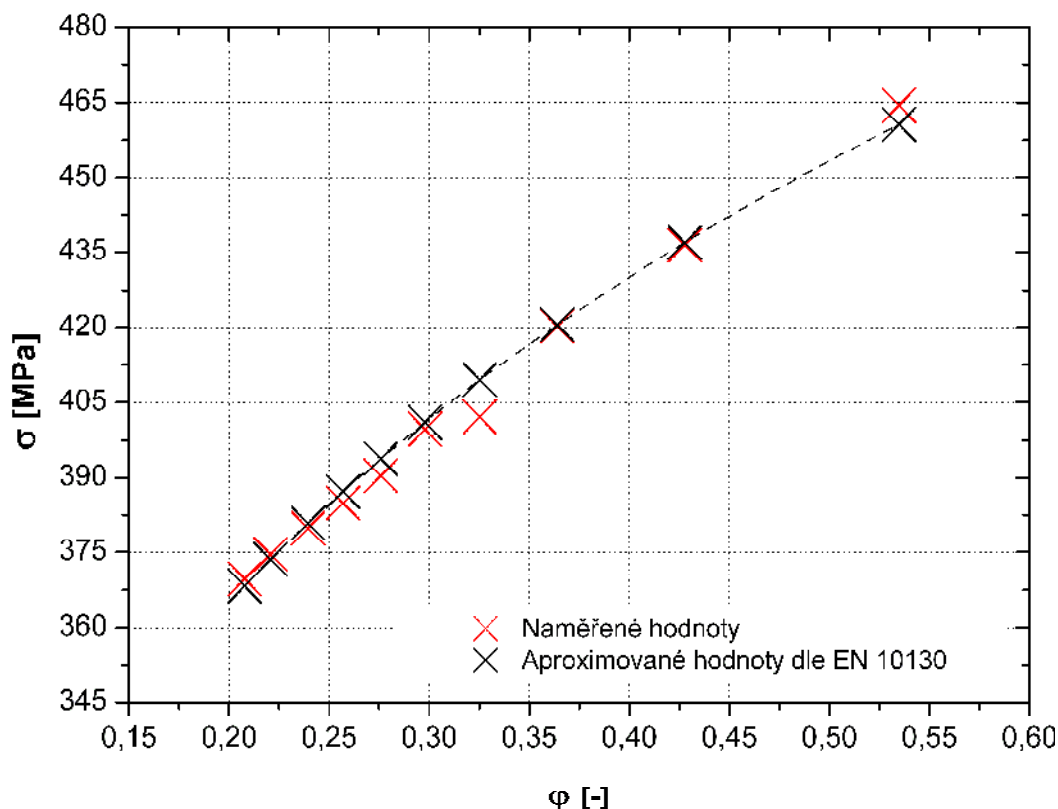


**Obr. 40** Aproximované a skutečné hodnoty – materiál DX 54 (směr odebrání 0°)

#### Aproximované (EN 10 130) a naměřené hodnoty tahového diagramu

Tato aproximace je v oblasti od přetvoření  $\varphi = 0,1$  do oblasti přetvoření  $\varphi = 0,2$  (tahový diagram  $\sigma$ - $\varphi$  je opět aproximován dle vztahu 24). Porovnání aproximace a skutečných hodnot bylo provedeno pouze pro oblast krčku, v oblastech dále od krčku pro nás nemá význam právě z důvodu lokalizace napětí. Aproximace byla provedena v programu OriginPro Plus.

$$\sigma = C \cdot \varphi^n [\text{MPa}] \quad (24)$$



**Obr. 41** Aproximované a skutečné hodnoty – materiál DX 54 (směr odebrání 0°)

V Tab. 12 jsou naměřené a vypočtené hodnoty pro materiál DX 54 (směr odebrání 0°). Ve sloupci čas jsou body, ve kterých se počítaly hodnoty přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$ . Okamžitá šířka  $t$ , tloušťka  $b$  a plocha vzorku  $S$  jsou rozměry vzorku počítané pro zvolené časové okamžiky. Přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$  jsou také pro jednotlivé zvolené body měření. Hodnota  $\sigma_{\text{apx}}$  je hodnota napětí vypočítaná pomocí aproximace dle ČSN ISO 10275. Tabulka s uvedenými hodnotami je uvedena z důvodu velkého rozsahu diplomové práce pouze pro materiál DX 54 (směr odebrání 0°).

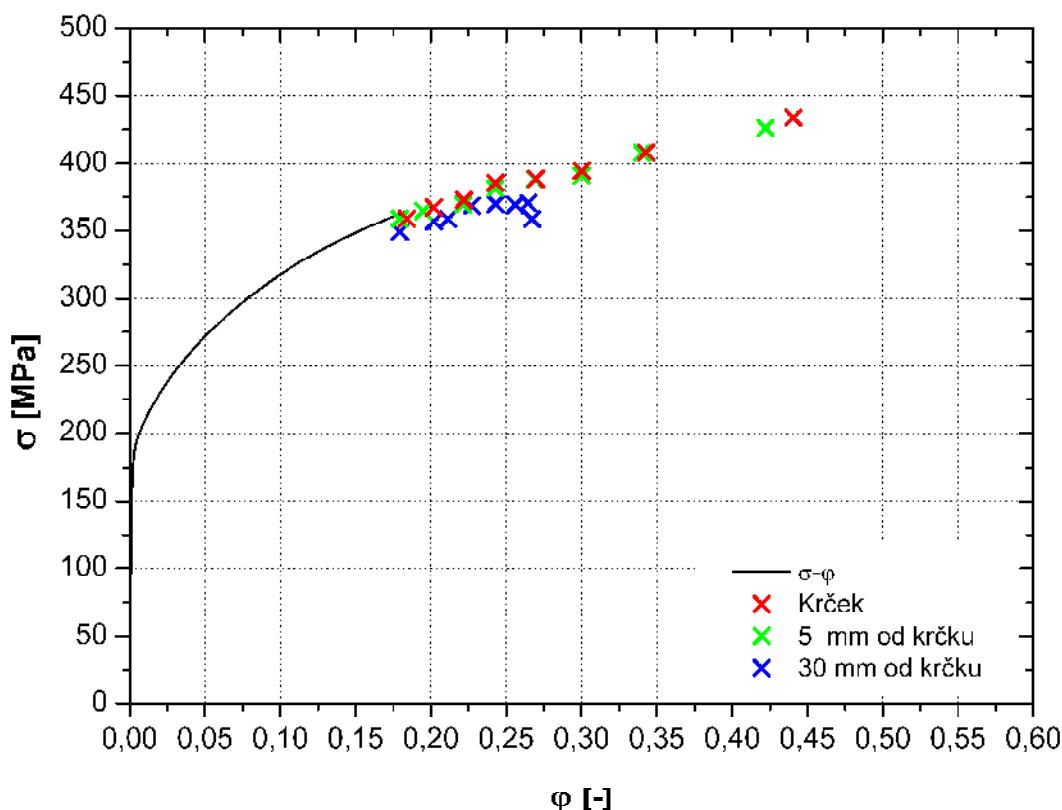
**Tab. 12** Vypočtené hodnoty pro materiál DX 54 (směr odebrání 0°) v oblasti krčku

Čas zkoušky	Okamžitá šířka vzorku	Okamžitá tloušťka vzorku	Okamžitá plocha vzorku	Přetvoření v krčku	Skutečné Napětí	Aproximované hodnoty napětí dle ČSN ISO 10275	Rozdíl $\sigma - \sigma_{\text{apx}}$
s	b	t	S	$\phi$	$\sigma$	$\sigma_{\text{apx}}$	$\Delta$
[sec]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
86,67	17,586	0,686	12,062	0,208	369,7	368,3	1,4
91,34	17,437	0,682	11,895	0,221	374,6	373,7	0,9
96,00	17,288	0,678	11,718	0,239	379,8	380,9	-1,1
100,67	17,139	0,674	11,545	0,257	384,9	387,4	-2,5
105,34	16,990	0,668	11,351	0,276	390,4	394,0	-3,6
110,00	16,692	0,662	11,047	0,298	399,7	401,2	-1,6
114,67	16,692	0,654	10,918	0,325	402,1	409,7	-7,6
119,34	16,096	0,643	10,347	0,364	420,3	420,8	-0,5
124,00	15,659	0,624	9,769	0,428	436,4	437,2	-0,9
128,34	14,904	0,591	8,804	0,535	464,4	461,1	3,3



### 9.1.2 Materiál DX 54 (směr odebrání 45°)

Skutečný tahový diagram pro materiál DX 54 (směr odebrání 45°) je na Obr. 42, stejně jako u předchozího vzorku končí na mezi pevnosti a dále jsou zobrazeny body skutečných přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  v oblasti krčku (červeně označené) ve vzdálenosti 5 mm od krčku (zeleně) a 30 mm od krčku (modrou barvou). Opět je vlivem lokalizace napětí a deformace značný nárůst obou hodnot v oblasti krčku a těsně okolo něho.



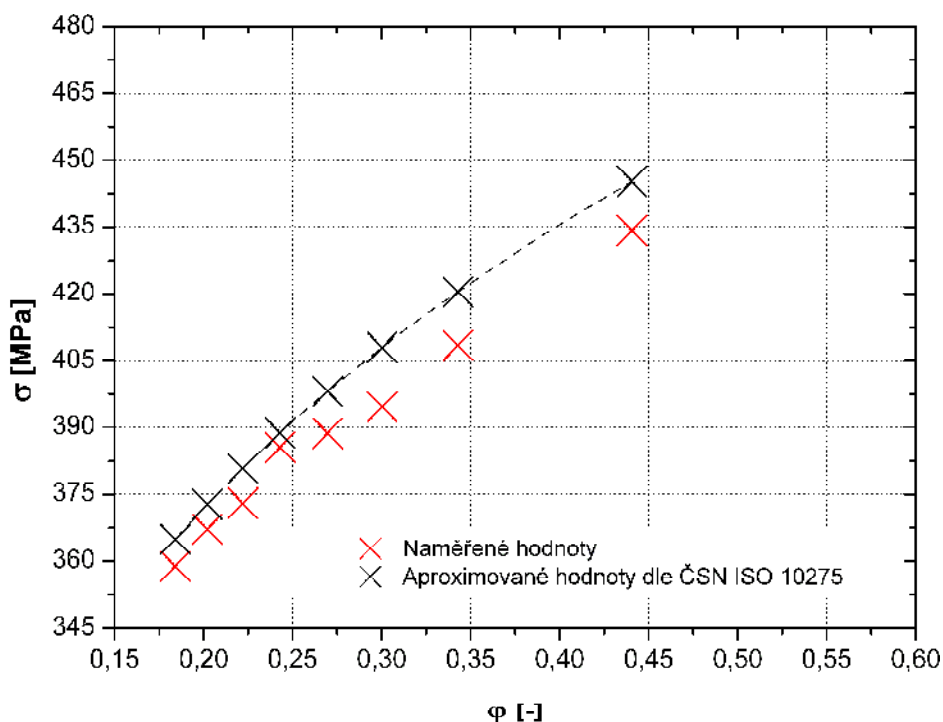
**Obr. 42** Skutečný tahový diagram - materiál DX 54 (smě odebrání 0°)

Srovnání obou hodnot je provedeno pouze pro oblast krčku (stejným způsobem jako v případě předchozího vzorku). Vzhledem k rozsahu této práce nejsou uvedeny grafy aproximací, jsou uvedeny pouze výsledky obou aproximací (Tab. 13) a porovnání skutečných a aproximovaných hodnot přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$ . V Tab. 13 jsou hodnoty modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  pro materiál DX 54 (směr odebrání 45°) vypočtené aproximací dle ČSN ISO 10275 a EN 10130. Na Obr. 43 a 44 je grafické srovnání **naměřených** a **aproximovaných** hodnot  $\sigma$  a  $\varphi$ .

**Tab. 13** Porovnání modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  - materiál DX 54 (směr odebrání 45°)

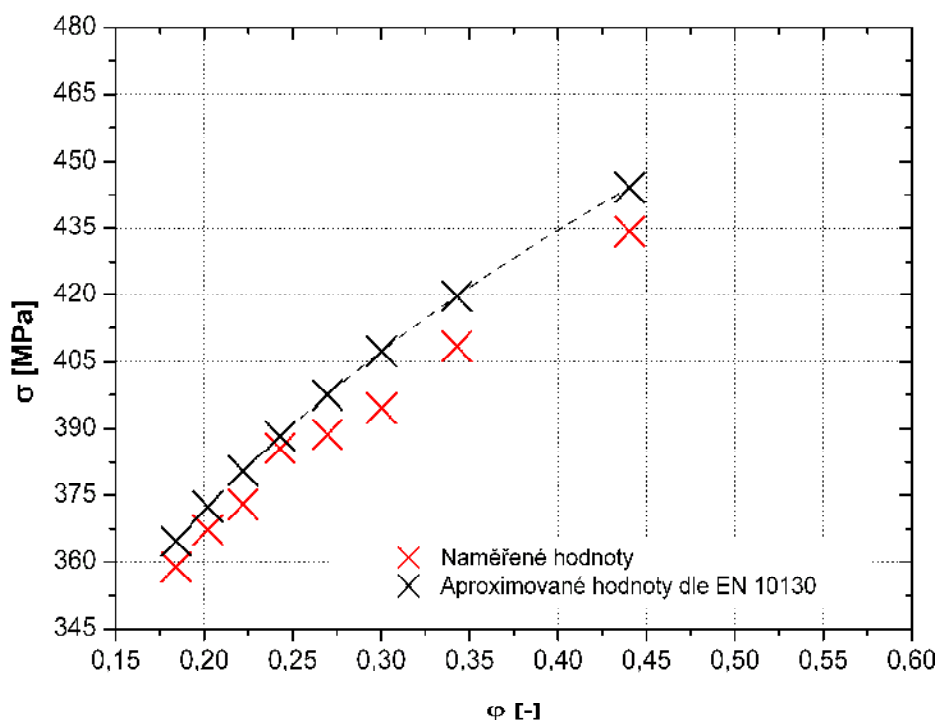
Materiál	ČSN ISO 10275	ČSN ISO 10275	EN 10 130	EN 10 130
	$C$ [MPa]	$n$ [-]	$C$ [MPa]	$n$ [-]
DX 54 - směr odebrání 45°	536,57	0,228	534,30	0,226

### Aproximované (ČSN ISO 10275) a naměřené hodnoty tahového diagramu



Obr. 43 Aproximované a skutečné hodnoty – materiál DX 54 (směr odebrání 45°)

### Aproximované (EN 10 130) a naměřené hodnoty tahového diagramu

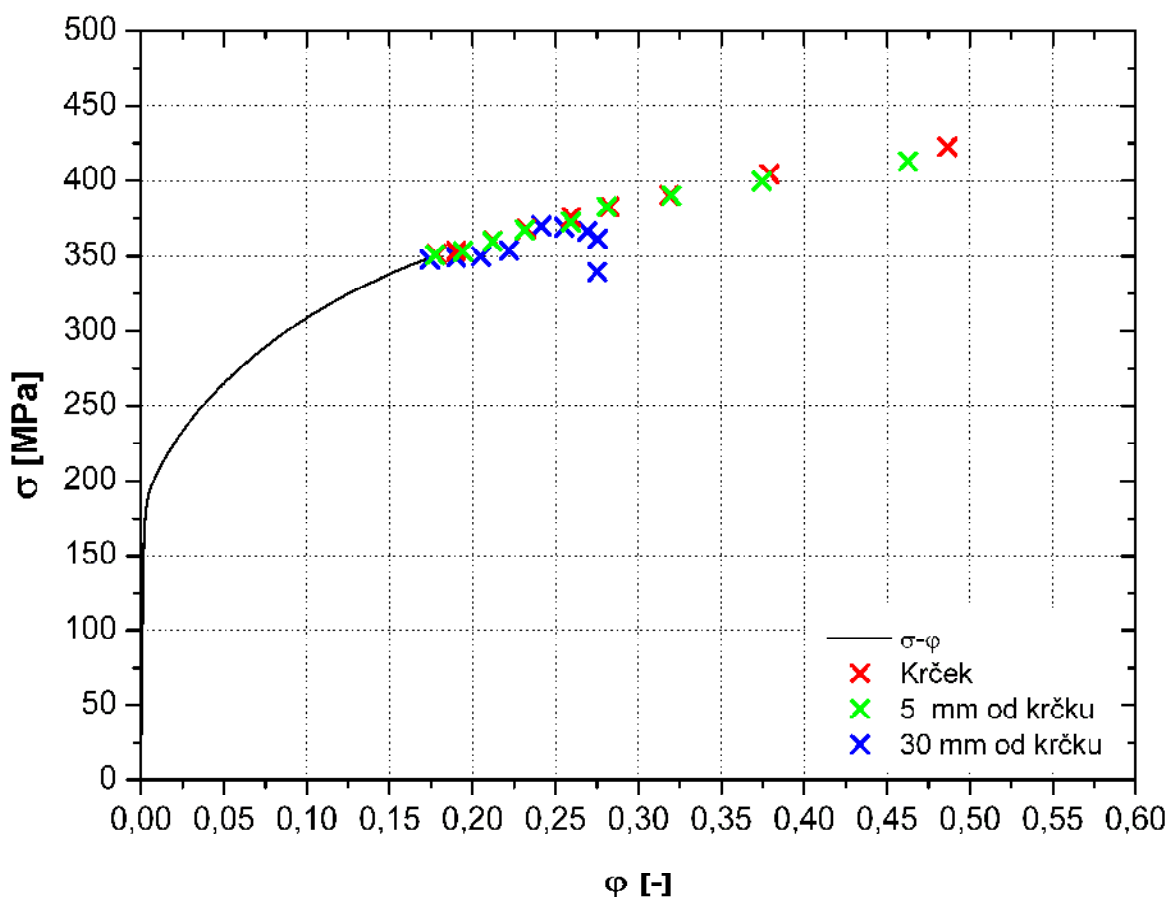


Obr. 44 Aproximované a skutečné hodnoty – materiál DX 54 (směr odebrání 45°)

Z Obr. 43 a 44 je patrné, že rozdíl mezi hodnotami skutečného napětí a aproximovanými hodnotami je opět větší než u směru odebrání 0°. Stejně jako v předchozím případě jsou hodnoty výrazně nižší v průměru téměř o deset MPa.

### 9.1.3 Materiál DX 54 (směr odebrání 90°)

Stejně jako u předchozích vzorků se i v tomto případě potvrdil průběh skutečných přetvoření za mezí pevnosti a lokalizace deformace a napětí do oblasti krčku. Dle Obr. 45 je opět největší nárůst v oblasti krčku (body označeny červenou barvou) a těsně okolo něho, v oblasti 30 mm od krčku (body označeny modrou barvou) je přetvoření a napětí již výrazně menší, tedy stejný trend jako v předchozím případě.



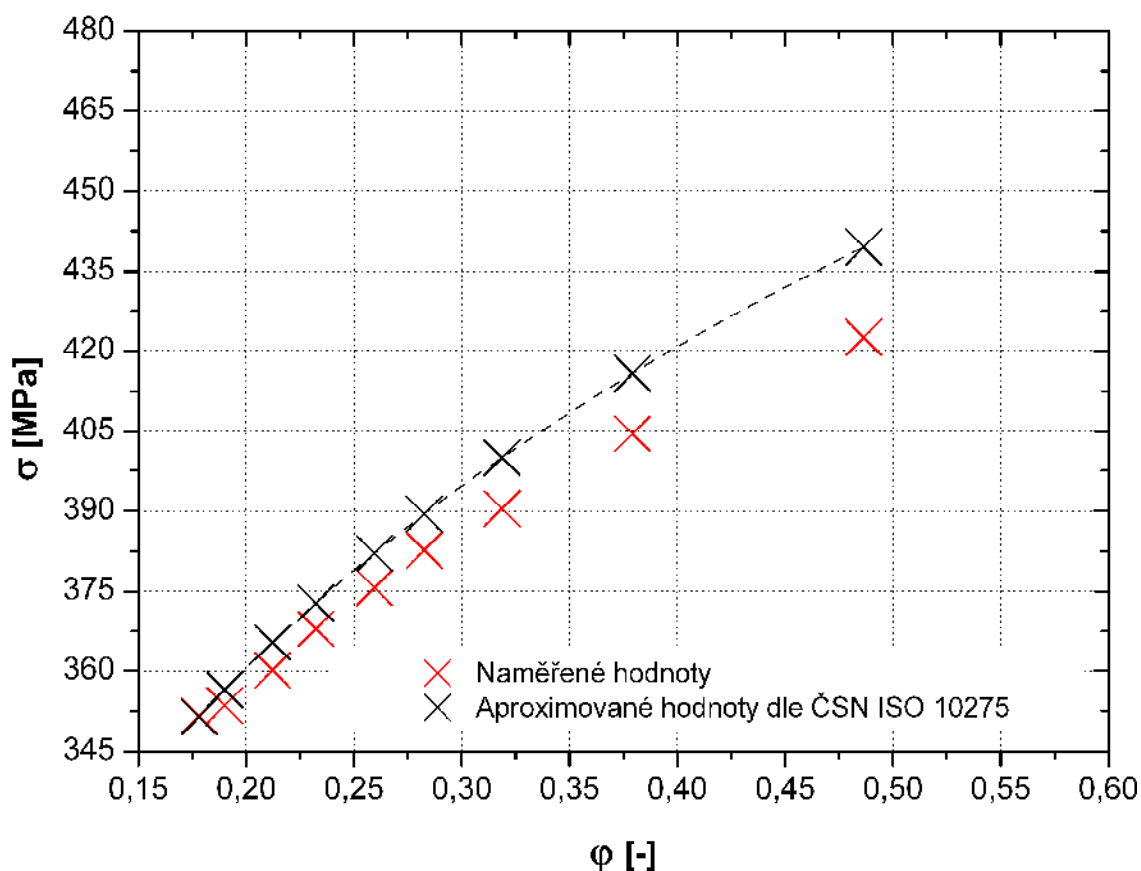
**Obr. 45** Skutečný tahový diagram pro materiál DX 54 ve směru odebrání 90°

Vzhledem k průběhu napětí v místech vzorku jsme opět z důvodu lokalizace napětí a přetvoření provedli porovnání skutečných a aproximovaných hodnot pouze pro oblast krčku. Opět je z Obr. 46 zřetelné, že **skutečné** hodnoty jsou nižší než **aproximované** hodnoty přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$ . Hodnoty skutečného přetvoření a napětí se dle předpokladu nejvíce blíží aproximovaným hodnotám v oblasti meze pevnosti a s narůstajícím přetvořením a napětím jsou skutečné hodnoty nižší oproti hodnotám aproximovaným. Výsledky obou aproximací (Tab. 14) pro směr odebrání 90° vykazují při porovnání větší rozdíl oproti směrům odebrání 0° a 45°.

**Tab. 14** Porovnání modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  - materiál DX 54 (směr odebrání  $45^\circ$ )

Materiál	ČSN ISO 10275	ČSN ISO 10275	EN 10 130	EN 10 130
	$C$ [MPa]	$n$ [-]	$C$ [MPa]	$n$ [-]
DX 54 - směr odebrání $90^\circ$	516,13	0,223	510,35	0,217

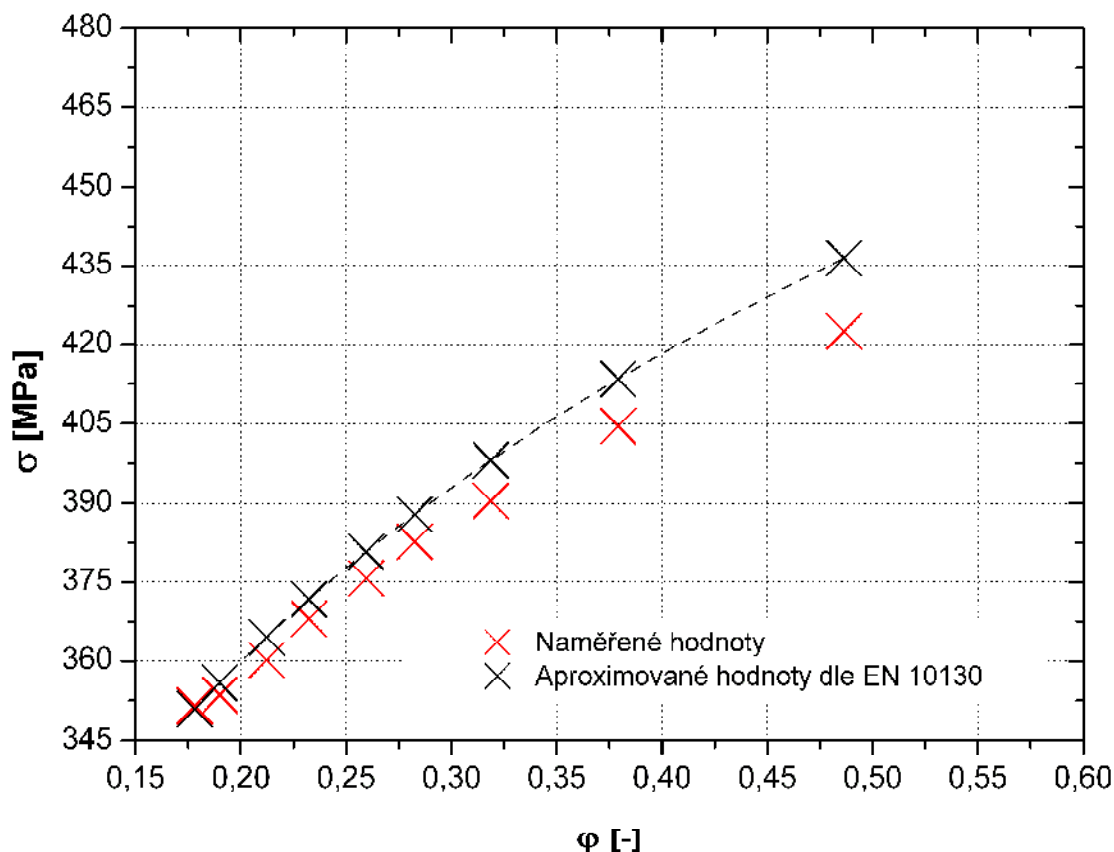
**Aproximované (ČSN ISO 10275) a naměřené hodnoty tahového diagramu**



**Obr. 46** Aproximované a skutečné hodnoty – materiál DX 54 (směr odebrání  $90^\circ$ )

**Aproximované (EN 10 130) a naměřené hodnoty tahového diagramu**

Vzhledem k průběhu napětí v místech vzorku jsme opět z důvodu lokalizace napětí a přetvoření provedli porovnání skutečných a aproximovaných hodnot stejně jako v předchozím případě pouze pro oblast krčku. Na Obr. 47 jsou **skutečné** hodnoty přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$  a odpovídající **aproximované** hodnoty. Skutečné hodnoty jsou stejně jako při porovnání s aproximací dle ČSN ISO 10275 nižší než aproximované. Opět je zřetelné, že v oblasti na mezi pevnosti jsou aproximované a skutečné hodnoty téměř stejné a s rostoucím přetvořením a napětím se rozdíly obou hodnot zvětšují, přitom je skutečné přetvoření a napětí menší.



**Obr. 47** Aproximované a skutečné hodnoty – materiál DX 54 (směr odebrání 90°)

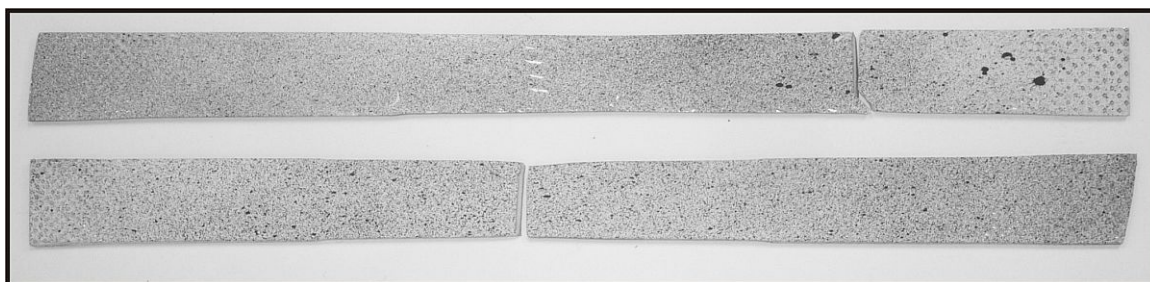
Podle výsledků všech tří vzorků (ve směru 0°, 45° a 90°) je jasné patrné, že hodnoty skutečného napětí jsou nižší než hodnoty napětí aproximované dle ČSN ISO 10275 a EN 10130. Hodnoty skutečného napětí  $\sigma$  i přetvoření  $\phi$  klesají oproti aproximovaným hodnotám se vzdáleností od krčku a snižují se v závislosti na průběhu zkoušky. Největší rozdíly těchto napětí jsou u vzorků ze směru 45° a 90°, nejnižší rozdíly potom vykazují vzorky ze směru 0°. Dle Tab. 15 je vidět, že způsob aproximace nemá výraznější vliv na rozdíl skutečných a aproximovaných hodnot. Výrazně nižší hodnoty modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  byla naměřena ve směru odebrání 90°.

**Tab. 15** Porovnání modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  - materiál DX 54 (všechny směry odebrání)

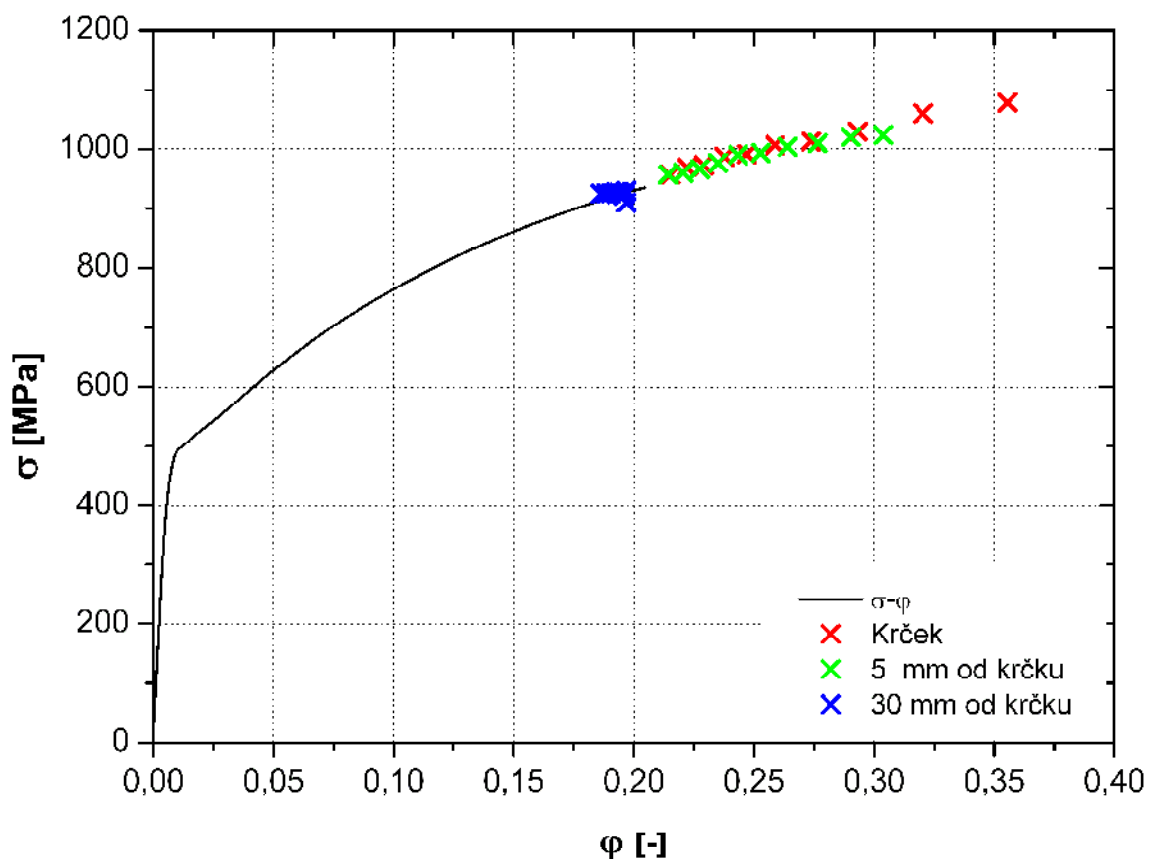
Materiál	ČSN ISO 10275	ČSN ISO 10275	EN 10 130	EN 10 130
	$C$ [MPa]	$n$ [-]	$C$ [MPa]	$n$ [-]
DX 54 - směr odebrání 0°	535,06	0,238	534,24	0,237
DX 54 - směr odebrání 45°	536,57	0,228	534,30	0,226
DX 54 - směr odebrání 90°	516,13	0,223	510,35	0,217

## 9.2 Materiál RA-K 40/70

Pro materiál RA-K 40/70 byly změřeny dva zkušební vzorky, v důsledku náročného výpočtu byl zpracován pouze jeden z naměřených vzorků. Zpracován byl vzorek lépe naměřený bezkontaktním optickým měřicím systémem ARAMIS z důvodu lepšího odečtu rozměrů (u druhého vzorku se krček vytvořil u kraje vzorku). Na Obr. 48 jsou vzorky materiálu RA-K 40/70 po přetržení, výpočty byly provedeny pro vzorek níže porušený ve větší vzdálenosti od kraje.



Obr. 48 Vzorky materiálu RA-K 40/70 po přetržení



Obr. 49 Skutečný tahový diagram – materiál RA-K 40/70

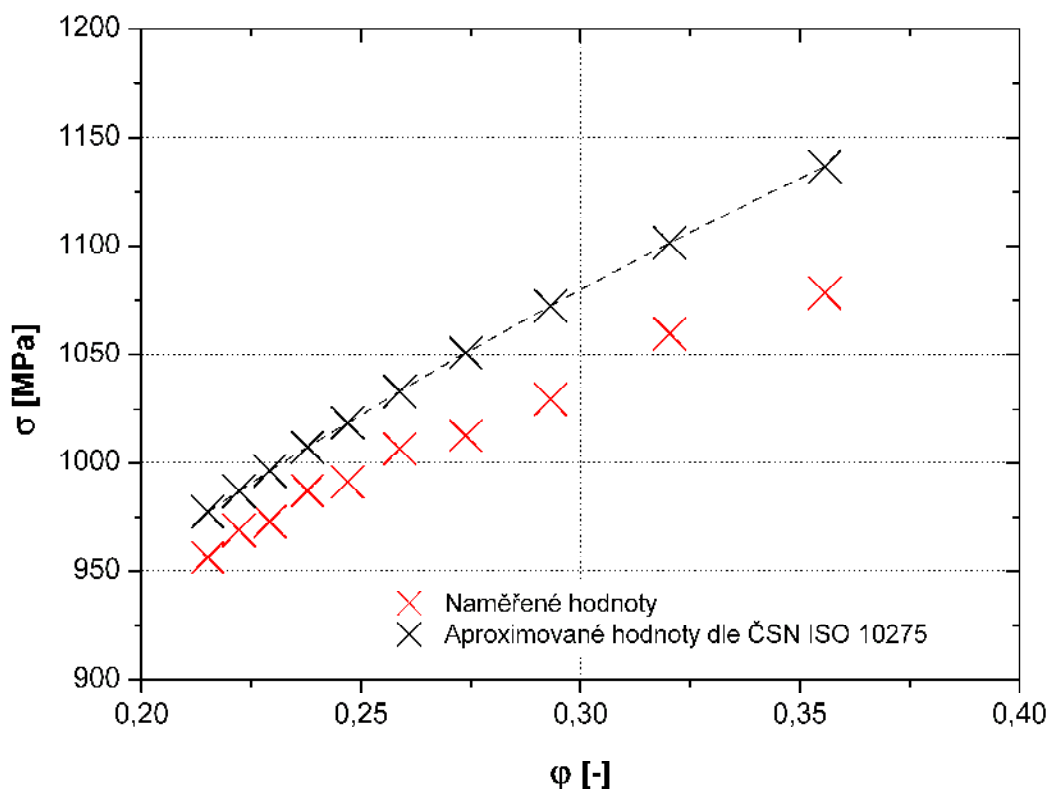
Stejně jako u materiálu DX 54 jsou pro materiál RA-K 40/70 hodnoty modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  jen málo odlišné (Tab. 16). Stejně tak rozdíl mezi skutečnými hodnotami s aproximovanými hodnotami dle ČSN ISO 10275 a EN 10130 je téměř stejný. Lze tedy opět říci, že způsob aproximace nemá vliv na přesnost měření. Nejmenší rozdíl skutečných a aproximovaných hodnot je v okolí meze pevnosti a největší těsně před porušením. Skutečné hodnoty nabývají menších hodnot než hodnoty aproximované.

**Tab. 16** Porovnání modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  - materiál RA-K 40/70

Materiál	ČSN ISO 10275	ČSN ISO 10275	EN 10 130	EN 10 130
	$C$ [MPa]	$n$ [-]	$C$ [MPa]	$n$ [-]
RA-K 40/70	1539,21	0,296	1550,55	0,300

#### Aproximované (ČSN ISO 10275) a naměřené hodnoty tahového diagramu

Aproximace skutečného tahového diagramu  $\sigma - \varphi$  byla provedena stejně jako u předchozího materiálu DX 54, hodnoty jsou porovnávány s aproximovanými hodnotami pouze v oblasti krčku. Na Obr. 50 je zřetelný rozdíl skutečného napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\varphi$  oproti **aproximovaným** hodnotám. **Skutečné** hodnoty jsou nižší v řádech několika desítek MPa. Tento rozdíl je oproti hlubokotažné oceli způsoben odlišným materiálem RA-K 40/70, který patří do skupiny vysokopevnostních ocelí.

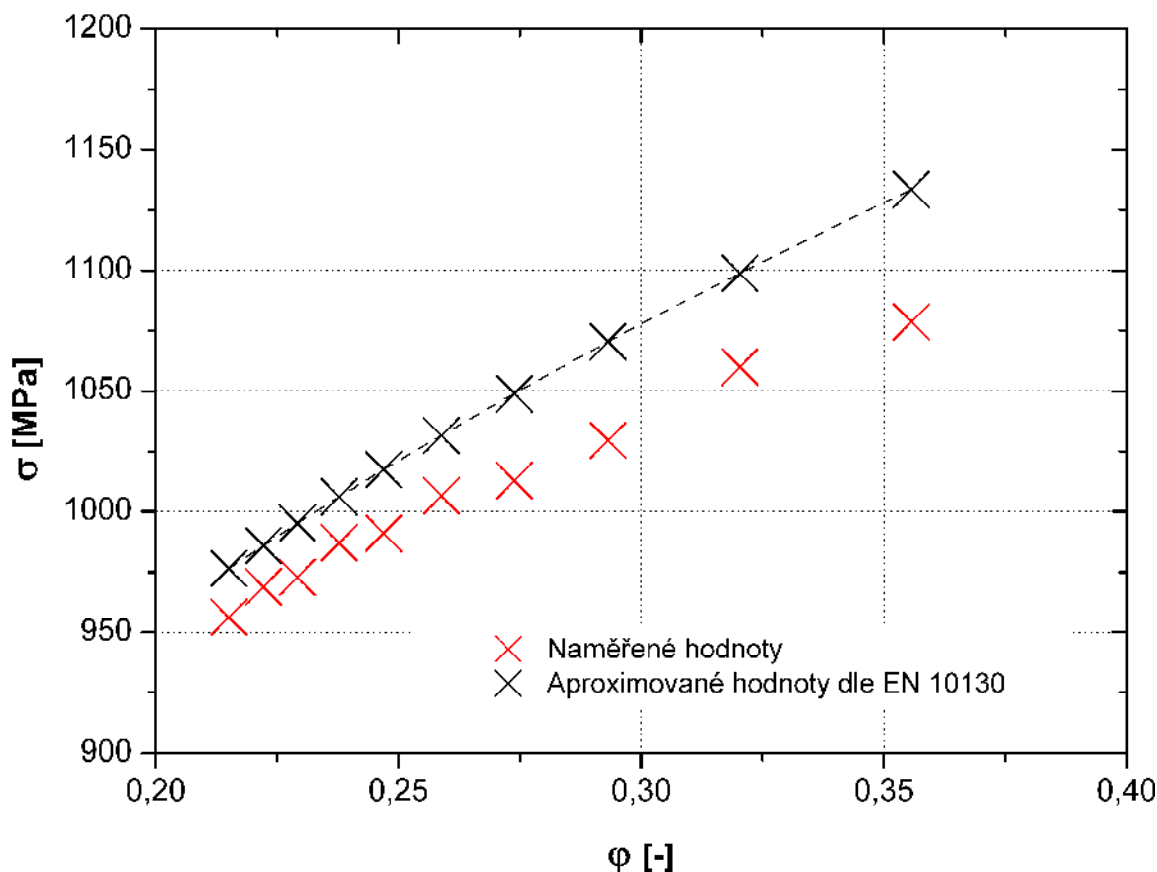


**Obr. 50** Aproximované a skutečné hodnoty – materiál RA-K 40/70

### Aproximované (EN 10 130) a naměřené hodnoty tahového diagramu

Vzhledem k vysoké tažnosti materiálu RA – K 40/70 jsme mohli využít i aproximaci dle EN 10130. Rozsah aproximace v našem případě byl  $\phi = 0,1 - 0,2 [-]$ , takže způsob aproximace byl proveden stejným způsobem jako pro materiál DX 54, opět jsou skutečné hodnoty porovnávány s aproximovanými pouze pro oblast krčku.

Obr. 51 znázorňuje graf s porovnáním skutečných a aproximovaných hodnot pro materiál RA – K 40/70 v oblasti krčku. Stejně jako v předchozím případě je rozdíl **aproximovaných** a **skutečných** hodnot v řádech desítek MPa. Stejně jako u materiálu DX 54 se skutečné hodnoty blíží nejvíce aproximovaným v oblasti okolí meze pevnosti. S narůstajícím přetvořením a napětím jsou skutečné hodnoty výrazně nižší než hodnoty aproximované.



Obr. 51 Aproximované a skutečné hodnoty – materiál RA-K 40/70

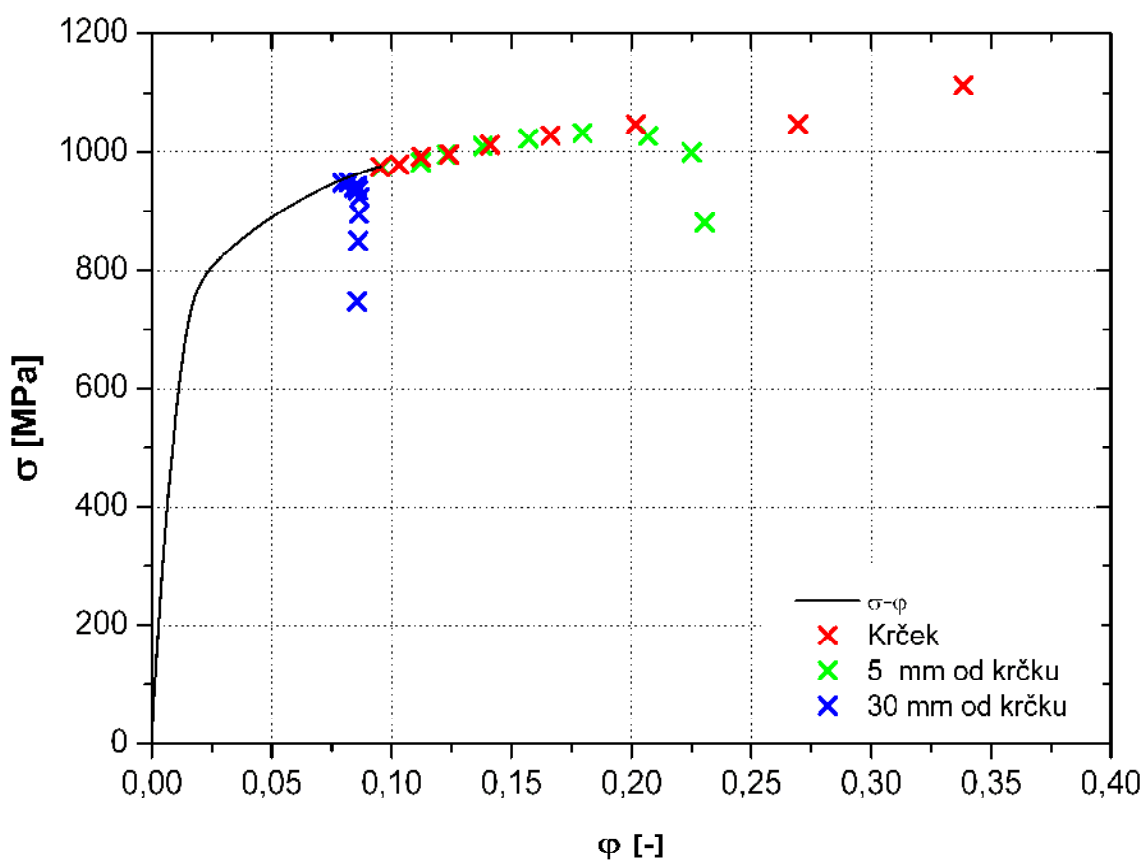


### 9.3 Materiál CP-W 800

Materiál CP-W 800 je zástupce vysokopevnostního materiálu, stejně jako u pevnostního materiálu RA-K 40/70 byly naměřeny dva vzorky a vypočítány hodnoty pouze pro jeden. Na Obr. 52 jsou vzorky materiálu CP-W 800, vzorky označené číslem 1 a 2 jsou porušené a vzorek označený číslem 3 je před statickou zkouškou tahem. Výpočty byly provedeny pouze pro vzorek označený číslem 2 z důvodu velkého rozsahu této práce a množství výpočtů.



Obr. 52 Vzorky materiálu CP-W 800



Obr. 53 Skutečný tahový diagram – materiál CP-W 800

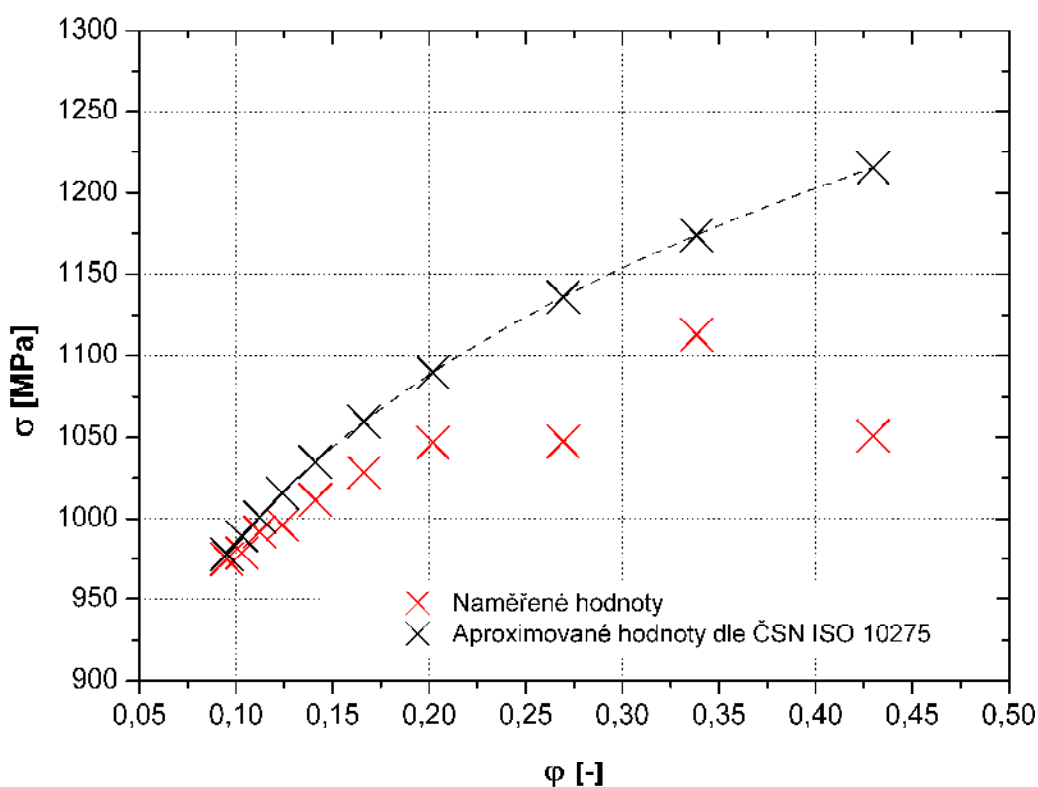
### Aproximované (ČSN ISO 10275) a naměřené hodnoty tahového diagramu

U materiálu CP-W 800 byla naměřena velmi malá tažnost. Vzhledem k rozsahu aproximace dle EN 10130  $\varphi = 0,1 - 0,2$  (resp.  $\varphi = 0,1 - 0,15$ ) nebylo možné tuto aproximaci provést, protože materiál CP-W 800 nedosahuje takových přetvoření. Provedena tedy byla pouze aproximace dle ČSN ISO 10275 - hodnoty jsou uvedeny v Tab. 17.

**Tab. 17** Porovnání modulu monotónního zpevnění C a exponentu deformačního zpevnění n - materiál CP-W 800

Materiál	ČSN ISO 10275	ČSN ISO 10275
	C [MPa]	n [-]
CP-W 800	1539,21	0,296

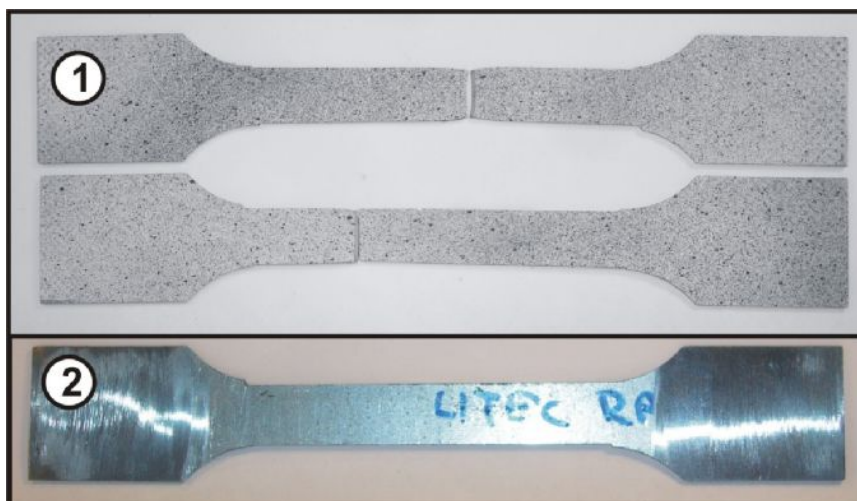
Jako v předchozích případech i pro materiál CP-W 800 provedeme srovnání skutečných a aproximovaných hodnot pouze pro oblast krčku. Z Obr. 54 je viditelný stejný průběh **skutečných** a **aproximovaných** hodnot. Skutečné přetvoření  $\varphi$  a deformace  $\sigma$  nabývají nižších hodnot než aproximované hodnoty. Opět je vidět, že v oblasti okolí meze pevnosti jsou skutečné hodnoty téměř totožné s aproximovanými. V oblasti zvyšování napětí a přetvoření hodnoty skutečného přetvoření výrazně klesají.



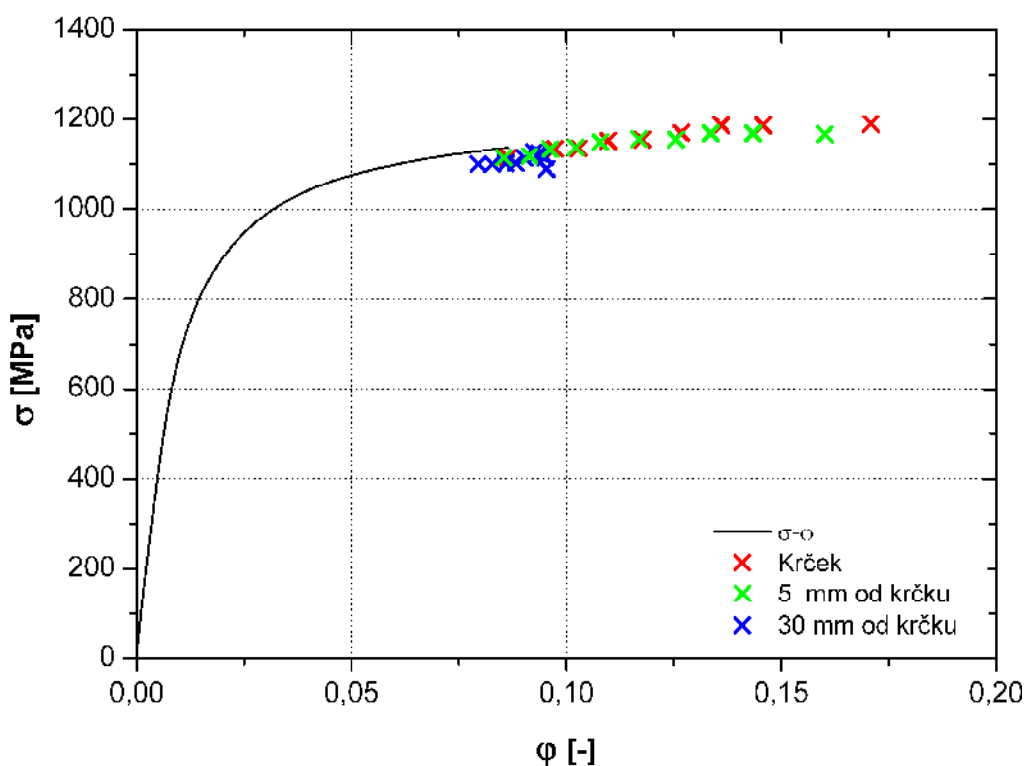
**Obr. 54** Aproximované a skutečné hodnoty – materiál CP-W 800

## 9.4 Materiál LITEC RAGAL 1000

LITEC RAGAL 1000 je vysokopevnostní ocel a poslední měřený materiál. Na Obr. 55 jsou vzorky materiálu LITEC RAGAL 1000. Číslem 2 je označený neporušený vzorek před nanesením speciální deformační sítě tzv. patternu. Porušený vzorek označený číslem 1 je použit pro výpočty skutečných přetvoření a napětí za mezí pevnosti. V případě materiálu LITEC RAGAL jsme měřili dva vzorky, pro výpočet byl použit vzorek porušený více od kraje.



Obr. 55 Vzorky materiálu LITEC RAGAL 1000



Obr. 56 Skutečný tahový diagram – materiál LITEC RAGAL 1000

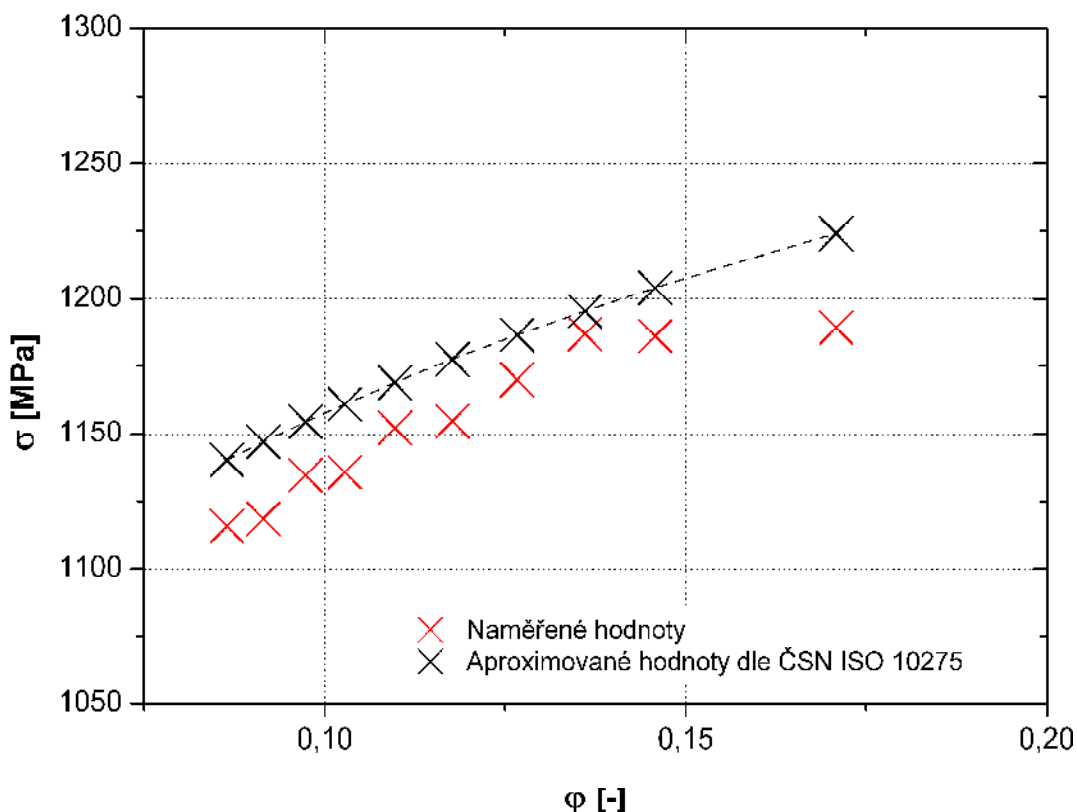
### Aproximované (ČSN ISO 10275) a naměřené hodnoty tahového diagramu

Jako u předchozích materiálů budeme porovnávat skutečné a aproximované hodnoty pouze v oblasti krčku. Aproximace dle EN 101 30 nebylo možné pro materiál LITEC RAGAL 1000 provést z důvodu malé deformace, tudíž je provedena pouze aproximace dle ČSN ISO 10275 - výsledky jsou v Tab. 18.

**Tab. 18** Porovnání modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  - materiál CP-W 800

Litec	ČSN ISO 10275	ČSN ISO 10275
	$C$ [MPa]	$n$ [-]
LITEC RAGAL 1000	1471,14	0,104

Rozdíl **skutečných** a **aproximovaných** hodnot na Obr. 57 opět ukazuje, že skutečné hodnoty přetvoření a napětí nabývají nižších hodnot než hodnoty aproximované. V grafu je vidět, že u materiálu LITEC RAGAL skutečné přetvoření a napětí nabývá nižších hodnot již v okolí meze pevnosti a to v řádu několika desítek MPa. V oblasti zvyšujícího se přetvoření a napětí se skutečné hodnoty pomalu blíží aproximovaným hodnotám, poslední hodnota je však opět nižší o několik MPa. Rozptyl těchto hodnot pro materiál LITEC RAGAL 1000 by bylo třeba ověřit v dalším měření, nebo může být způsobena specifickými vlastnostmi tohoto materiálu.



**Obr. 57** Aproximované a skutečné hodnoty – materiál LITEC RAGAL 1000

## 10 Diskuze výsledků

Podle naměřených a vypočtených hodnot lze jednoznačně říci, že skutečné hodnoty napětí  $\sigma$  a přetvoření  $\phi$  jsou v oblasti za meze pevnosti nižší než aproximované hodnoty dle ČSN SIO 10275 a EN 10130. Vzhledem k průběhu naměřených i aproximovaných hodnot přetvoření a napětí jsou nejmenší rozdíly mezi těmito hodnotami v okolí meze pevnosti. S narůstajícím přetvořením a napětím jsou rozdíly mezi těmito hodnotami větší. Tento závěr lze teoreticky očekávat, protože aproximace statické zkoušky tahem se provádí dle ČSN ISO 10275 pouze do meze pevnosti, za meze pevnosti se již aproximace provádí pouze dosazováním teoretického přetvoření do použitého vztahu pro aproximaci. Z důvodu lokalizace napětí do oblasti krčku je proto výpočet přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$  pomocí aproximace tahové zkoušky jen teoretický. Skutečností je to, že hodnoty přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$  jsou oproti hodnotám vypočteným aproximací pro téměř všechny naměřené body nižší. U hlubokotažných ocelí jsou tyto rozdíly velmi malé a skutečné hodnoty jsou od aproximovaných jen málo odlišné (menší než aproximované). U pevnostních ocelí jsou již hodnoty skutečného přetvoření a napětí o výrazně menší, a to až o desítky MPa. Obr. 58 ukazuje všechny měřené vzorky použité pro výpočet. Vzorky 1 – 3 jsou z hlubokotažné oceli DX 54 (směr odebrání 0°, 45° a 90°). Vzorek č. 4 je z materiálu RA-K 40/70. Č. 5 je materiál LITEC RAGAL 1000 a poslední vzorek s označením 6 je ocel s označením CP-W 800.



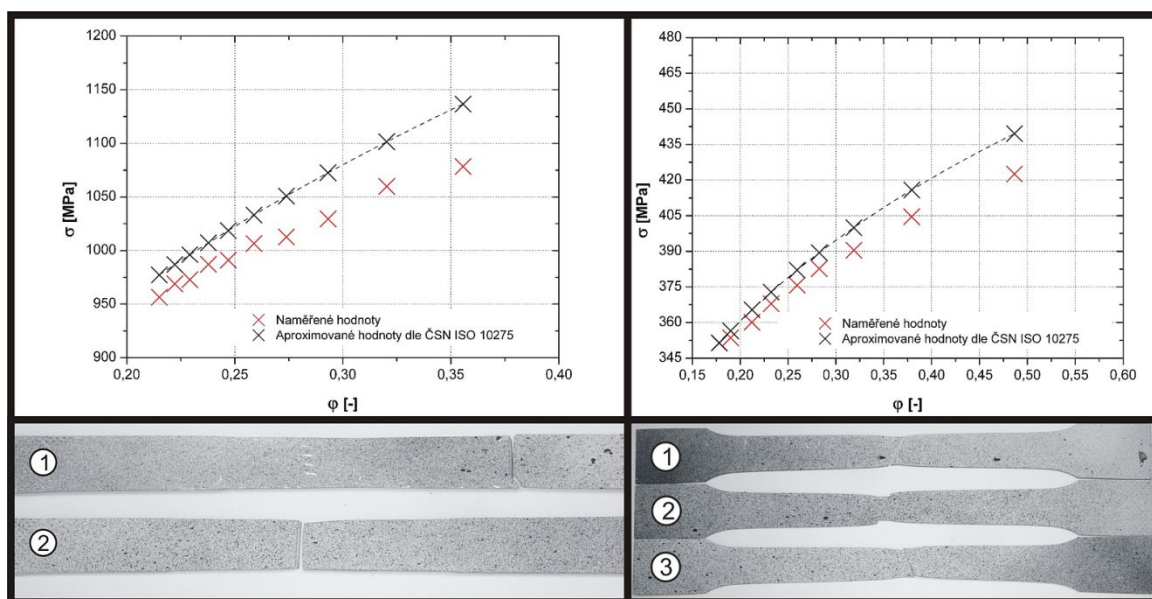
**Obr. 58** Vzorky všech materiálů po statické zkoušce tahem



## 11 Doporučení pro další výzkum

Rozdíly mezi aproximovanými a naměřenými hodnotami přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$  ukazují, že při zadání modulu monotónního zpevnění  $C$  a exponentu deformačního zpevnění  $n$  do numerické simulace tvářecího procesu jsou tyto hodnoty počítány aproximací přesně pouze do okamžiku meze pevnosti. Za mezí pevnosti jsou aproximací do numerické simulace tvářecího procesu dosazovány odlišné hodnoty přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$  než jsou ve skutečnosti. Z výsledků měřených vzorků v experimentální části této diplomové práce je zřetelné, že skutečné hodnoty jsou nižší. U hlubokotažných ocelí jsou rozdíly pouze v řádech MPa a u vysokopevnostních ocelí v řádech až desítek MPa.

Doporučením pro další výzkum je tedy provést numerickou simulaci tvářecího procesu pro hlubokotažné a vysokopevnostní oceli a dosadit do oblasti za mezí pevnosti skutečné hodnoty přetvoření  $\phi$  a napětí  $\sigma$ . Po provedení těchto numerických simulací porovnat výsledky s teoretickými hodnotami přetvoření a napětí a skutečnými hodnotami přetvoření a napětí. Z výsledků numerických simulací a jejich rozdílu bude možné stanovit chybu, které se dopouštíme při dosazování teoretických hodnot do numerické simulace tvářecího procesu. Vzhledem k rozdílu teoretických a skutečných hodnot u hlubokotažných a vysokopevnostních materiálů (viz Obr. 59) doporučujeme provést tyto simulace pro všechny měřené materiály v této práci. Na Obr. 59 vlevo je patrný rozdíl skutečného přetvoření a napětí pro materiál RA-K 40/70 pro vzorek 1, vpravo pro vzorek 3.



**Obr. 59** Porovnání rozdílů skutečného  $\sigma - \phi$   
(mat. RA-K40/70 a DX54 směr odebrání 90°)

## 12 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjistit skutečné přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  v materiálu za mezí pevnosti pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS od německé firmy GOM a porovnání skutečných hodnot s hodnotami vypočtenými aproximací tahové zkoušky dle příslušných norem. Materiály zvolené pro měření patří do skupiny ocelí běžně používaných pro stavbu automobilové karoserie. Mezi měřenými vzorky se nacházeli zástupci – hlubokotažná ocel DX 54, dvoufázová vysokopevnostní ocel LITEC RAGAL 1000, vícefázová vysokopevnostní ocel CP-W 800 a ocel s transformovaně idukovanou plasticitou RA-K 40/70.

Měření a výpočet skutečného přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  probíhalo v tribologické laboratoři katedry strojírenské technologie TUL a výpočetní stanici také na katedře strojírenské technologie. Pro měření byl použit trhací stroj TIRAtest 2300 (se softwarem LABtest 4), na kterém byla provedena statická zkouška tahem pro zvolené materiály. Současně probíhalo snímání statické zkoušky bezkontaktním měřicím systémem ARAMIS. Vyhodnocení dat z optického měřicího systému se provádělo ve výpočetní stanici.

K vyhodnocení okamžité šířky vzorku v měřených bodech byl použit program Image-Pro Plus. Pomocí hodnot z optického měřicího systému a programu Image-Pro Plus se vypočítaly hodnoty okamžitého přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  dle vzorce odvozeného v experimentální části této diplomové práce, pro výpočty byl použit program OriginPro 7.5, ve kterém jsou vytvořeny všechny grafy.

Výsledky experimentální části této diplomové práce byly zpracovány do grafů, kde jsou porovnány s teoretickými hodnotami vypočtenými aproximací tahové zkoušky. Sledované oblasti vypočtených hodnot skutečného přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  byly zvoleny v krčku, 5 mm od krčku a 30 mm od krčku. Z důvodů rozsahu této diplomové práce proběhly výpočty skutečných a aproximovaných hodnot pouze pro oblast krčku.

Dle porovnání skutečných a aproximovaných hodnot přetvoření a napětí lze konstatovat, že skutečné hodnoty jsou za mezí pevnosti nižší než hodnoty vypočítané aproximací tahové zkoušky. Aproximované hodnoty jsou u hlubokotažné oceli za mezí pevnosti odlišné v řádech několika MPa. U vysokopevnostních ocelí jsou však hodnoty vypočtené aproximací vyšší až o desítky MPa. Z grafů je viditelné, že se zvyšujícím se přetvořením  $\varphi$  a napětím  $\sigma$  je rozdíl mezi skutečnými a teoretickými hodnotami větší. Tento rozdíl je způsoben právě aproximací tahové zkoušky za mezí pevnosti, kdy je proces tváření nestabilní. Toto skutečné přetvoření  $\varphi$  a napětí  $\sigma$  za mezí pevnosti a fakt, že tyto hodnoty jsou nižší, může mít důležitý význam v numerických simulacích tvářecích procesů (především plošného tváření).





### 13 Seznam použité literatury

- [1] Wasserbauer, O.: *Modifikace vyhodnocování diagramů mezních přetvoření pro vysokopevnostní materiály pomocí sledování rozložení přetvoření podél měřeného vzorku*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2010.
- [2] Ponge, D.: *Structural Material – Steels*. Summer School, Hurtgerwald [on-line]. 2005 [cit. 2011-03-17]. Dostupné na Internetu: <[www.materialsknowledge.org](http://www.materialsknowledge.org)>
- [3] Doubek, P.: *Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších deformačních rychlostech deformace*. Disertační práce. Liberec: Vysokoškolský podnik, 2006.
- [4] Petruželka, J.: *Teorie tváření I*. 2.vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006.
- [5] Zrník, J.; Kraus, L.; Prnka, T.; Šterlink, K.: *Evropská strategie výrobních procesů*. 1.vyd. Praha: Votobia, 2007.
- [6] SOBOTKA, J.: *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů*. Disertační práce. Liberec: TU v Liberci, 2009.
- [7] Cugy, P. et al.: *A Super – High strength Fe – Mn – C Austenitic Steel with Excellent Formability for Automobile Application*, v Proc. Int. Conf. „Super – high Strength Steels”, AIM + CSM, Rome, 11/2005
- [8] TMĚJ, J.; MIKEŠ, V.: *Teorie tváření*. Skripta VŠST. Liberec: Vysokoškolský podnik, 1990.
- [9] VOLEK, A.: *Metodika souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos*. Diplomová práce. Brno: VUT v Brně, 2008.
- [10] Wikipedia: *Fotogrammetrie* [on-line]. 2010 [cit. 2011-03-15]. Dostupné na Internetu: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetrie>>.
- [11] GIS Tutorial: *Military Intelligence Satellites* [online]. 2011 [cit. 2011-04-10]. Dostupné na Internetu: <<http://www.facegis.com/index.php?kategori=1&postingid=121&tanggal=21&bulan=12&tahun=2010&minggu=3&fullcontent=1>>.
- [12] Indiamart Apm Technologies: *GIS Education & Training* [online]. 2011 [cit. 2011-03-25]. Dostupné na Internetu: <<http://www.indiamart.com/matrix-geosolu/gis-services.html>>.



- [13] MCAE Systems [online]. 2010 [cit. 2011-03-15]. Dostupné na Internetu: <<http://www.mcae.cz/aramis>>.
- [14] GOM [online]. 2010 [cit. 2011-03-15] Dostupné na Internetu: <<http://www.gom.com/metrology-systems.html>>.
- [15] MCAE Systems: ARAMIS [online]. 2010 [cit. 2011-03-16]. Dostupné na Internetu: <<http://www.mcae.cz/aramis>>.
- [16] MCAE Systems: ARGUS [online]. 2010 [cit. 2011-03-16]. Dostupné na Internetu: <<http://www.mcae.cz/argus>>.
- [17] MCAE Systems: PONTOS [online]. 2010 [cit. 2011-03-17]. Dostupné na Internetu: <<http://www.mcae.cz/pontos>>.
- [18] GOM ARAMIS user manual, B 2.1 CALIBRATION OBJECT
- [19] Indiamart Apm Technologies: Deformation strain measuring systems [online]. 2011 [cit. 2011-03-25]. Dostupné na Internetu: <<http://www.indiamart.com/apmtechnologies/deformation-strain-measuring-systems.html>>.
- [20] MACHEK, V.; VESELÝ, L.; VESELÝ, M.; VIŠŇÁK, J.: *Zpracování tenkých plechů*. Praha: SNTL Praha, 1983.
- [21] HERZTBERG, R. W.: *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. John Wiley & Sons, 1996.
- [22] Uživatelské manuály pro optický systém ARAMIS, firmy GOM GmbH.
- [23] ČSN EN – ISO 6892-1: *Kovové materiály – Zkouška tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*, 2009.
- [24] PLÁNIČKA, F.; KULIŠ, Z.: *Základy teorie plasticity*. Praha: ČVUT Praha, 2004.
- [25] HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M.: *Metal forming – Mechanics and Metallurgy*. New York: Camdrige University Press, 2007.
- [26] SMALLMAN, R. E.: *Moderní nauka o kovech*. Praha: SNTL Praha, 1965.



## 14 Seznam příloh

1. Protokoly statické zkoušky tahem testovaných materiálů
2. Reporty z měřicího optického systému ARAMIS testovaných materiálů
3. Skutečné tahové diagramy měřených vzorků (na přiloženém CD)
4. Smluvní tahové diagramy měřených vzorků (na přiloženém CD)
5. Aproximace zkoušky tahem dle ČSN ISO 102 75 (na přiloženém CD)
6. Aproximace zkoušky tahem dle EN 10 130 (na přiloženém CD)
7. Diplomová práce v elektronické podobě (na přiloženém CD)



## Příloha č. 1

### Protokoly statické zkoušky tahem testovaných materiálů

(DX 54, RA-K 40/70, CP-W 800,  
LITEC RAGAL 1000)



## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX 54 - směr odebrání 0°

Vypracoval: : Bc. Lukáš Horák

Norma: : EN - ISO 6892-1

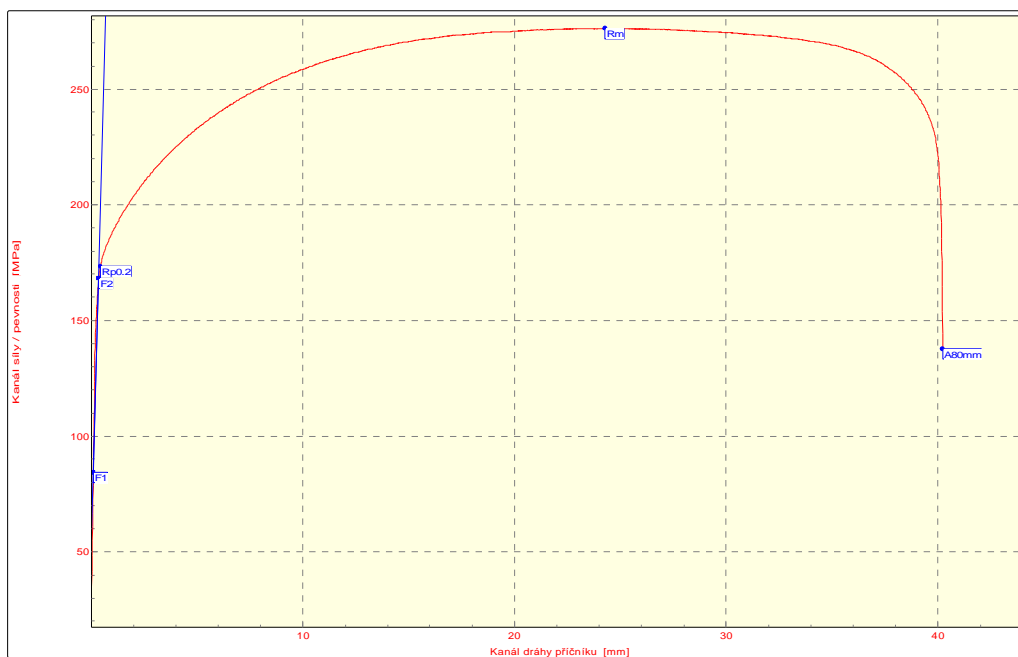
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

Rozměr vzorku: : [20,12 x 0,74] mm

Datum zkoušky: : 3.5.2011

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	183.3	299.7





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX 54 - směr odebrání 45°

Vypracoval: : Bc. Lukáš Horák

Norma: : EN - ISO 6892-1

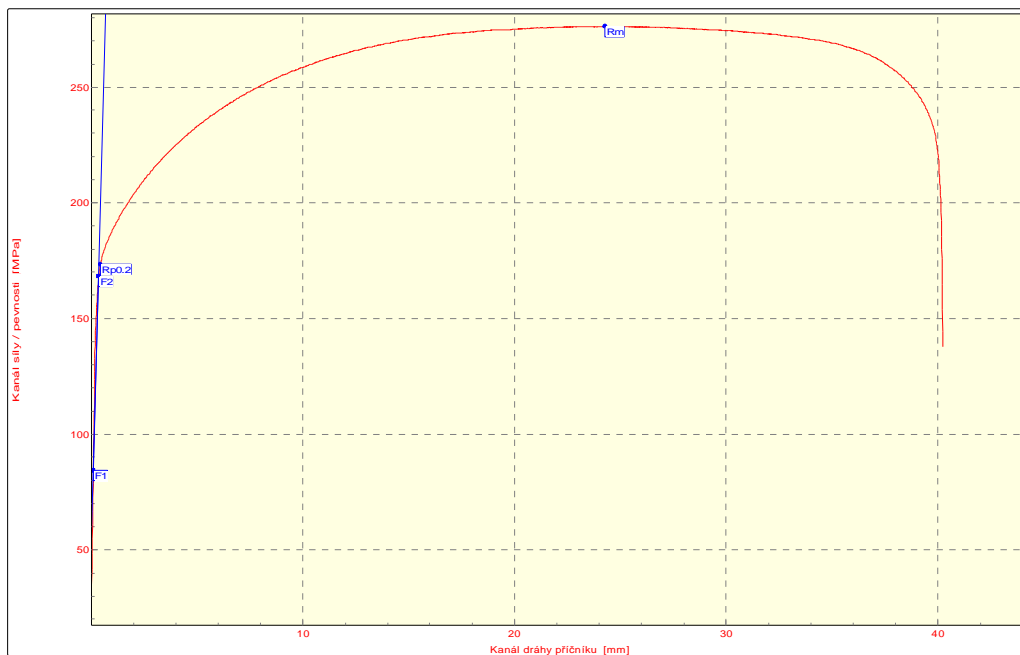
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

Rozměr vzorku: : [20,12 x 0,74] mm

Datum zkoušky: : 3.5.2011

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
3	189.7	304.5





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

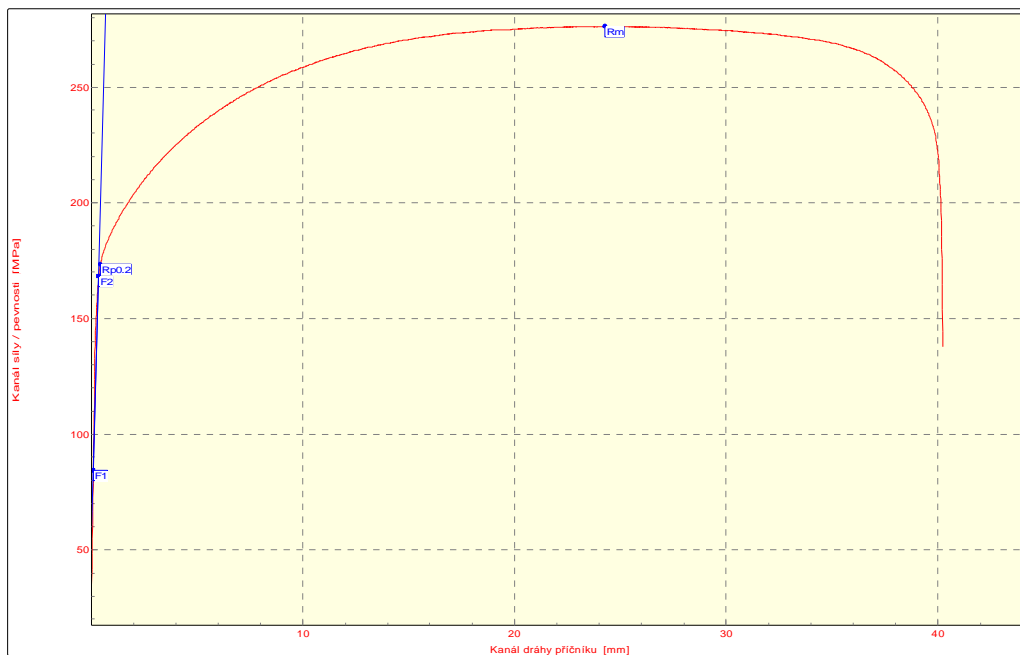
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DX 54 - směr odebrání 90°  
Vypracoval: : Bc. Lukáš Horák  
Norma: : EN - ISO 6892-1

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Rozměr vzorku: : [20,12 x 0,74] mm  
Datum zkoušky: : 3.5.2011

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
4	173.4	276.2







## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

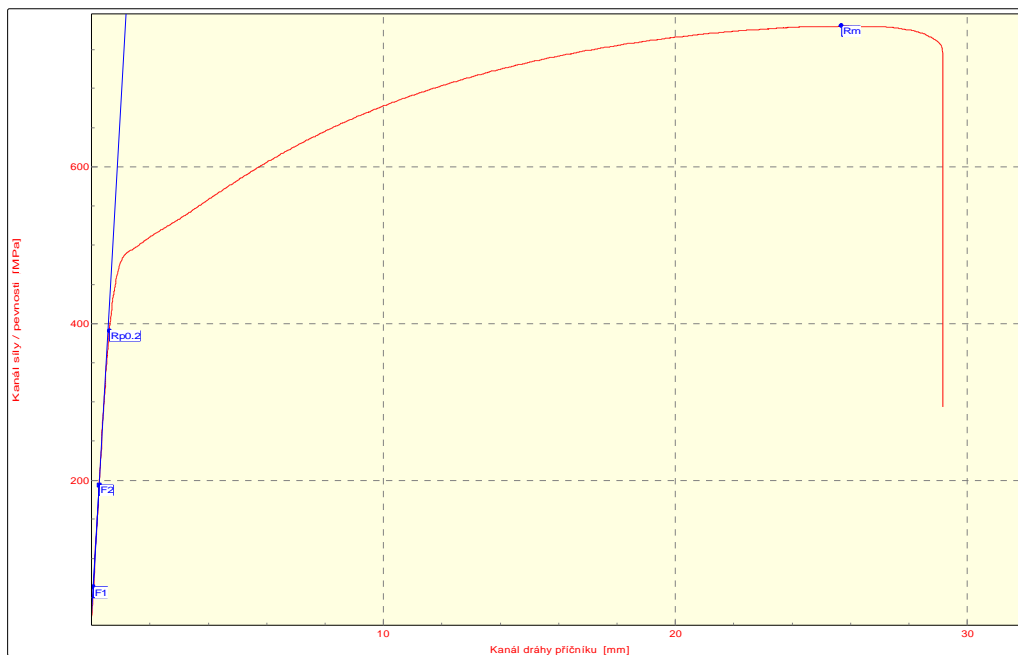
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : RA-K 40/70  
Vypracoval: : Bc. Lukáš Horák  
Norma: : EN - ISO 6892-1

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Rozměr vzorku: : [16,4 x 1,48] mm  
Datum zkoušky: : 3.5.2011

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
2	390.6	780.0





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : CP-W 800

Vypracoval: : Bc. Lukáš Horák

Norma: : EN - ISO 6892-1

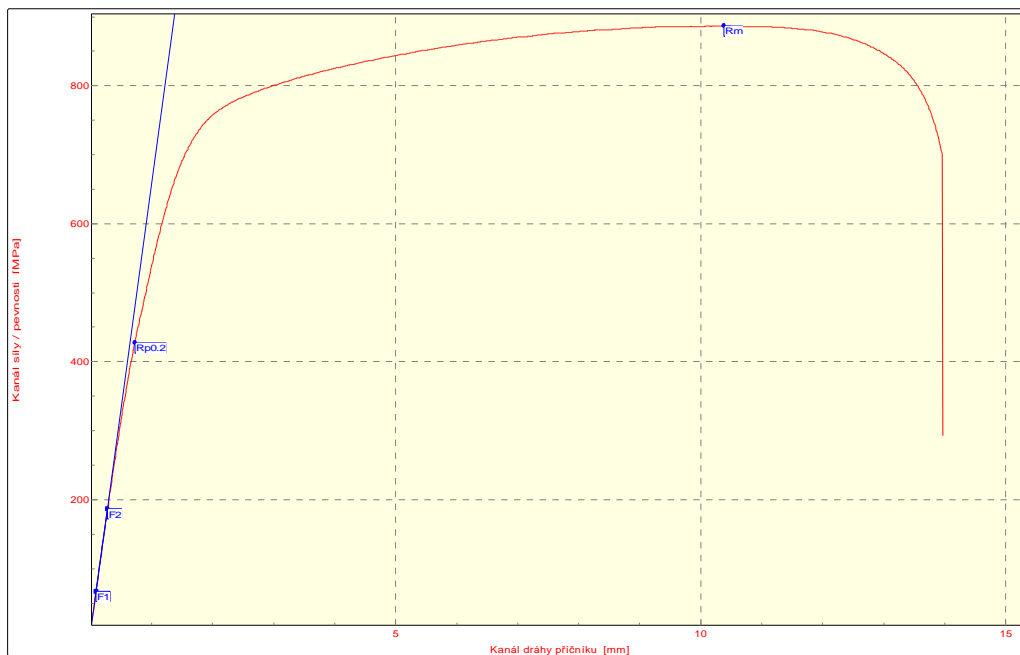
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min

Rozměr vzorku: : [16,41 x 2,05] mm

Datum zkoušky: : 3.5.2011

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	427.9	887.0





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: LITEC RAGAL 1000

Vypracoval: Bc. Lukáš Horák

Norma: EN - ISO 6892-1

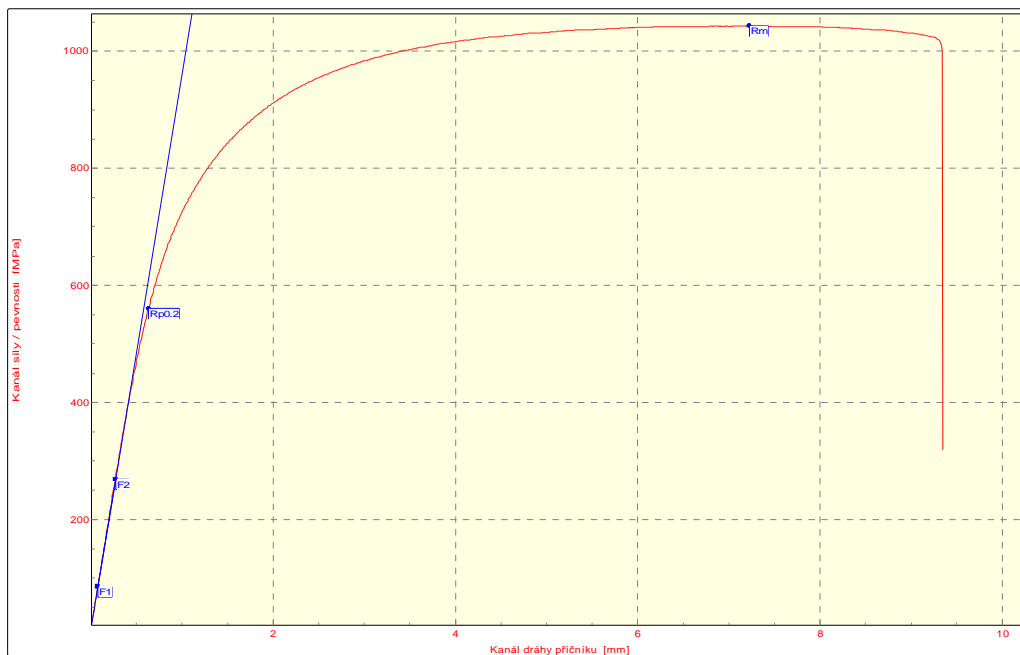
Rychlost zatěžování: 10 mm/min

Rozměr vzorku: [13,35 x 1,27] mm

Datum zkoušky: 3.5.2011

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
2	560.0	1043.4

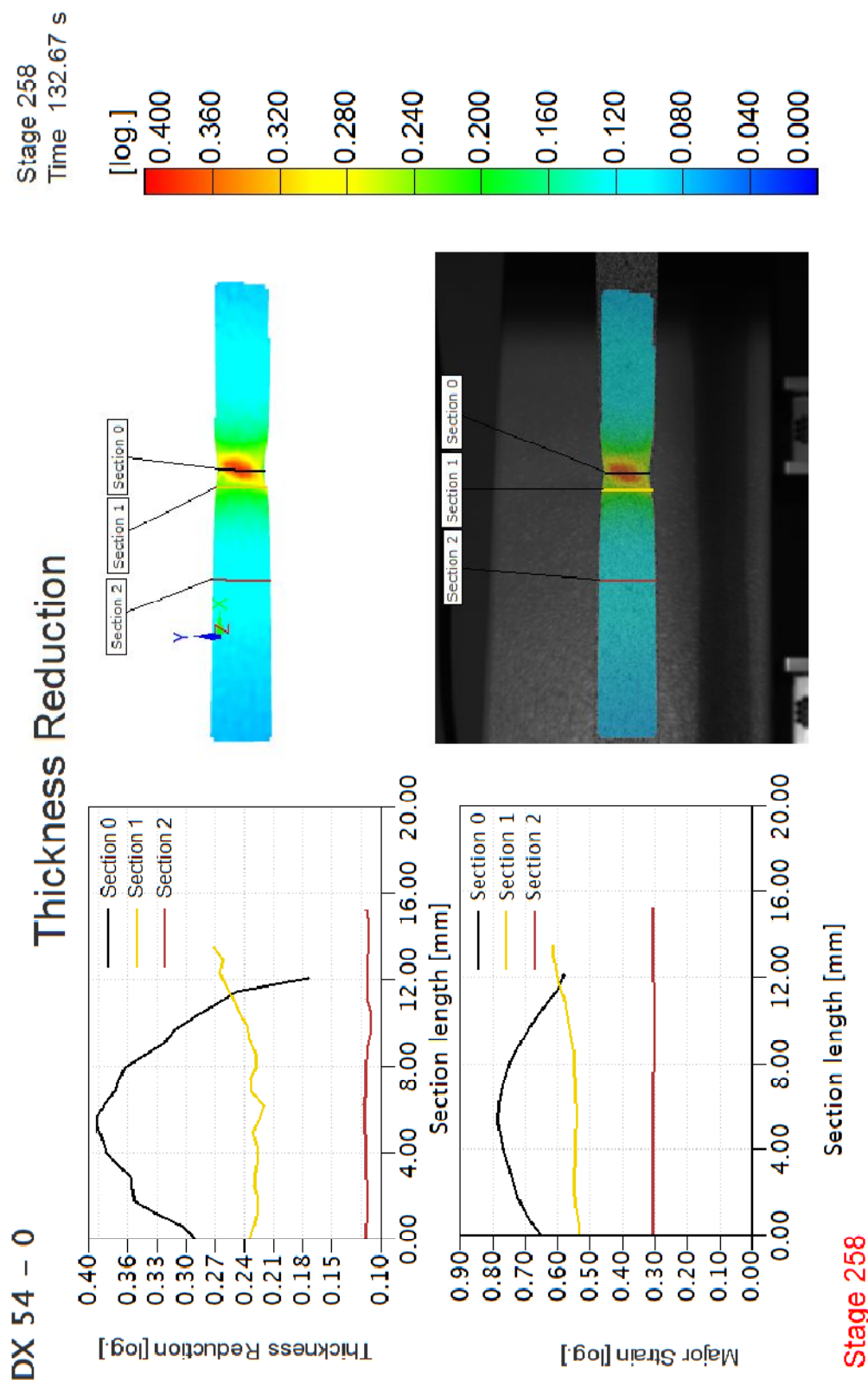


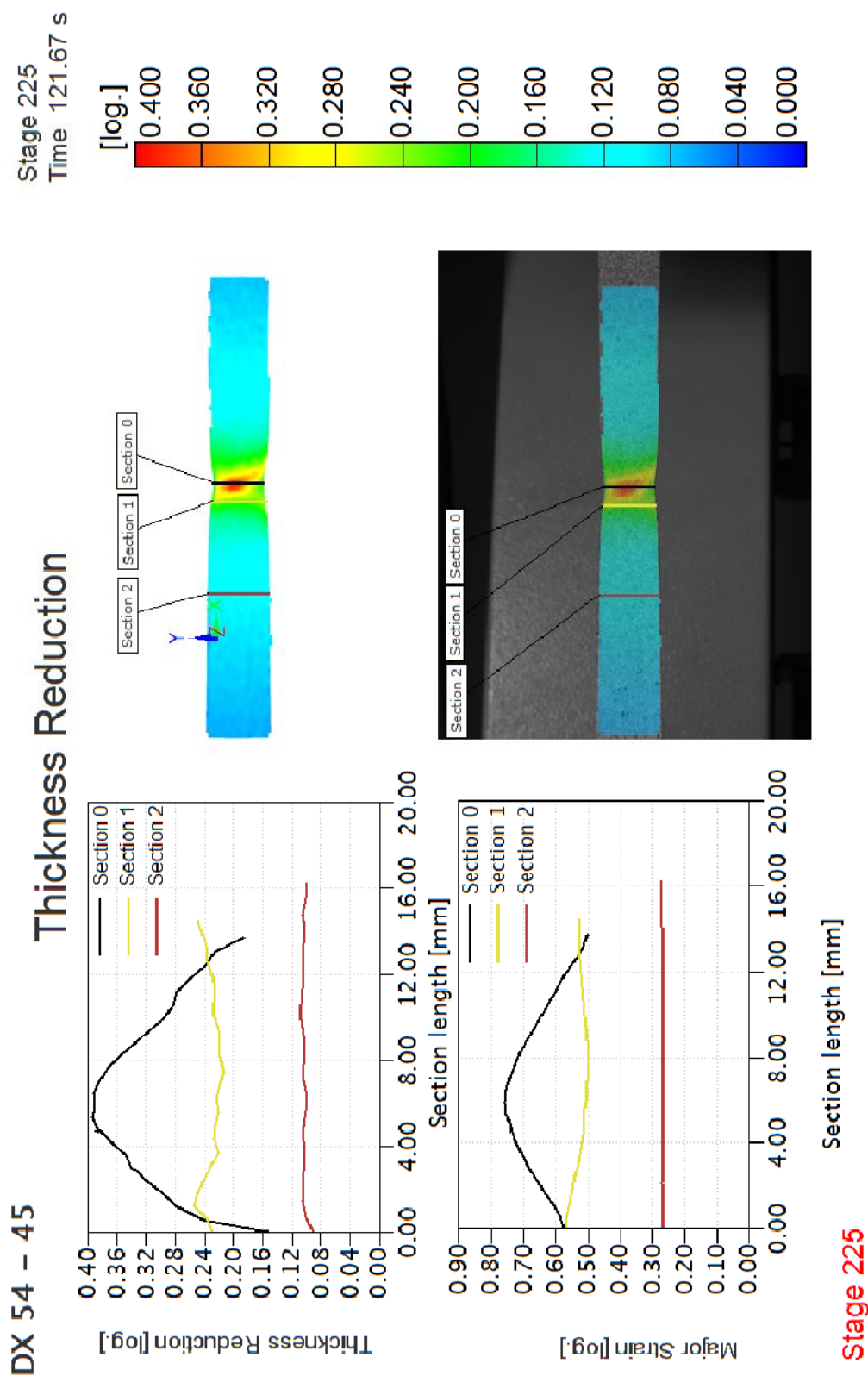


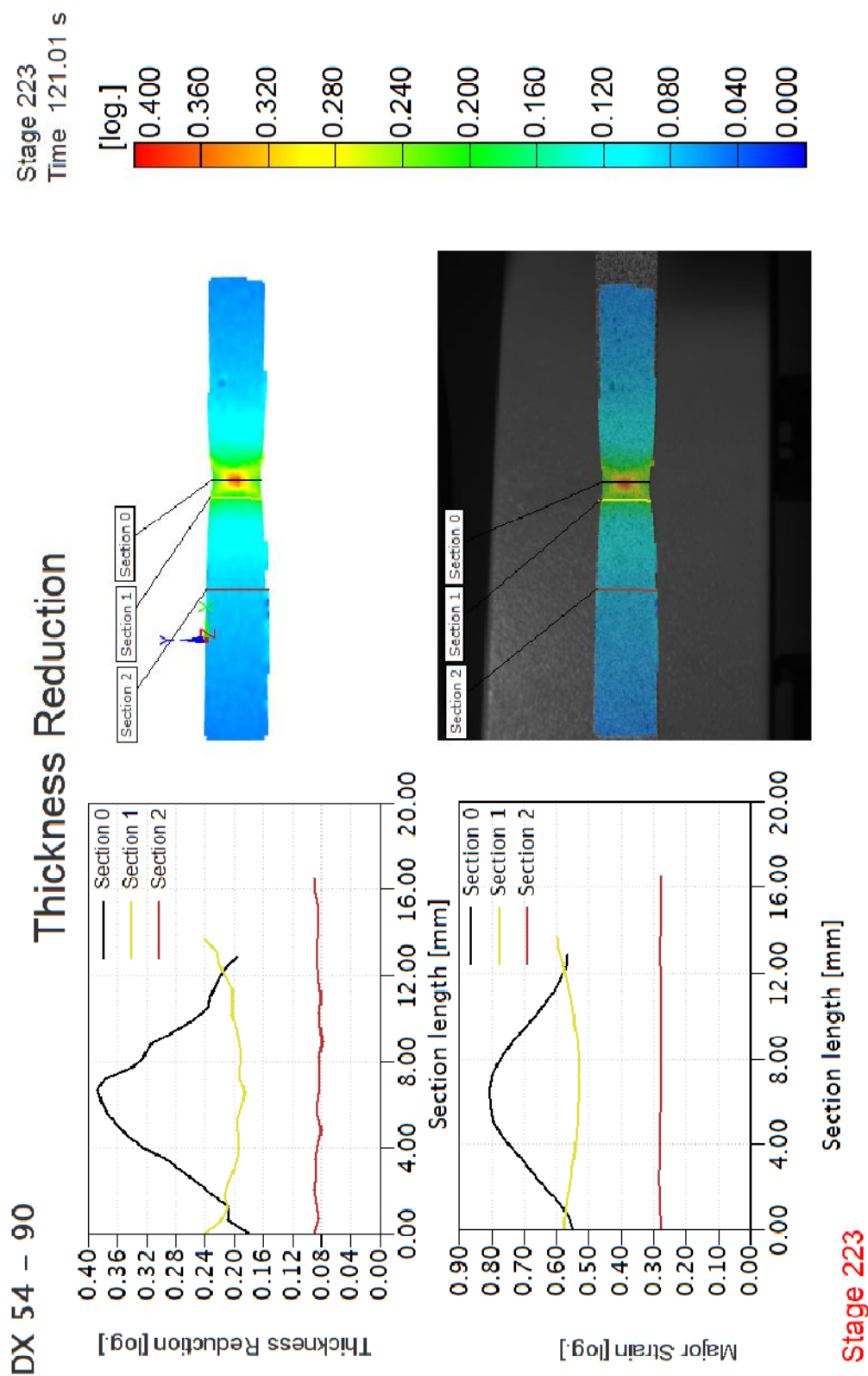
## Příloha č. 2

Reporty z měřicího optického systému ARAMIS  
testovaných materiálů

(DX 54, RA-K 40/70, CP-W 800,  
LITEC RAGAL 1000)





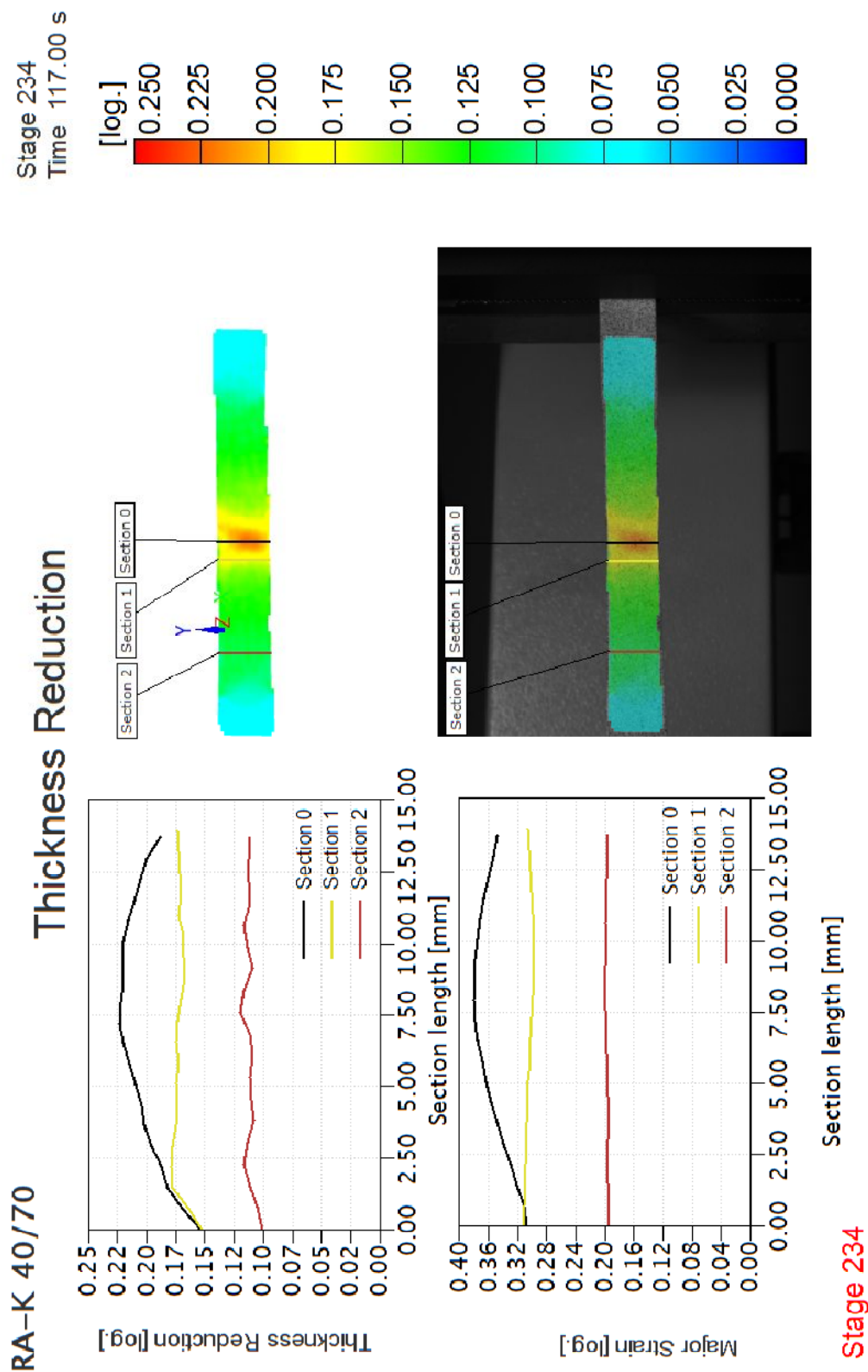


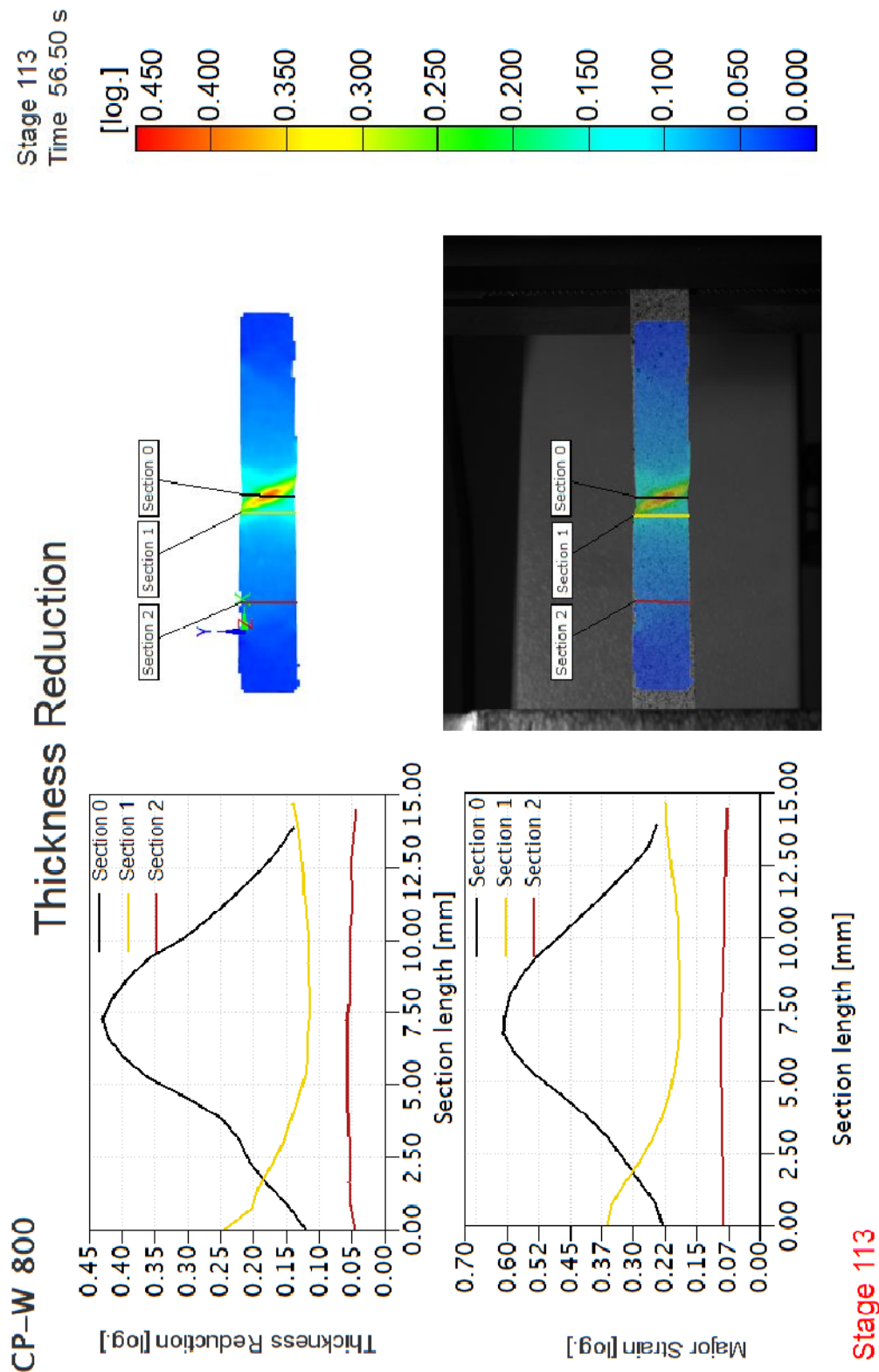
3/17/11

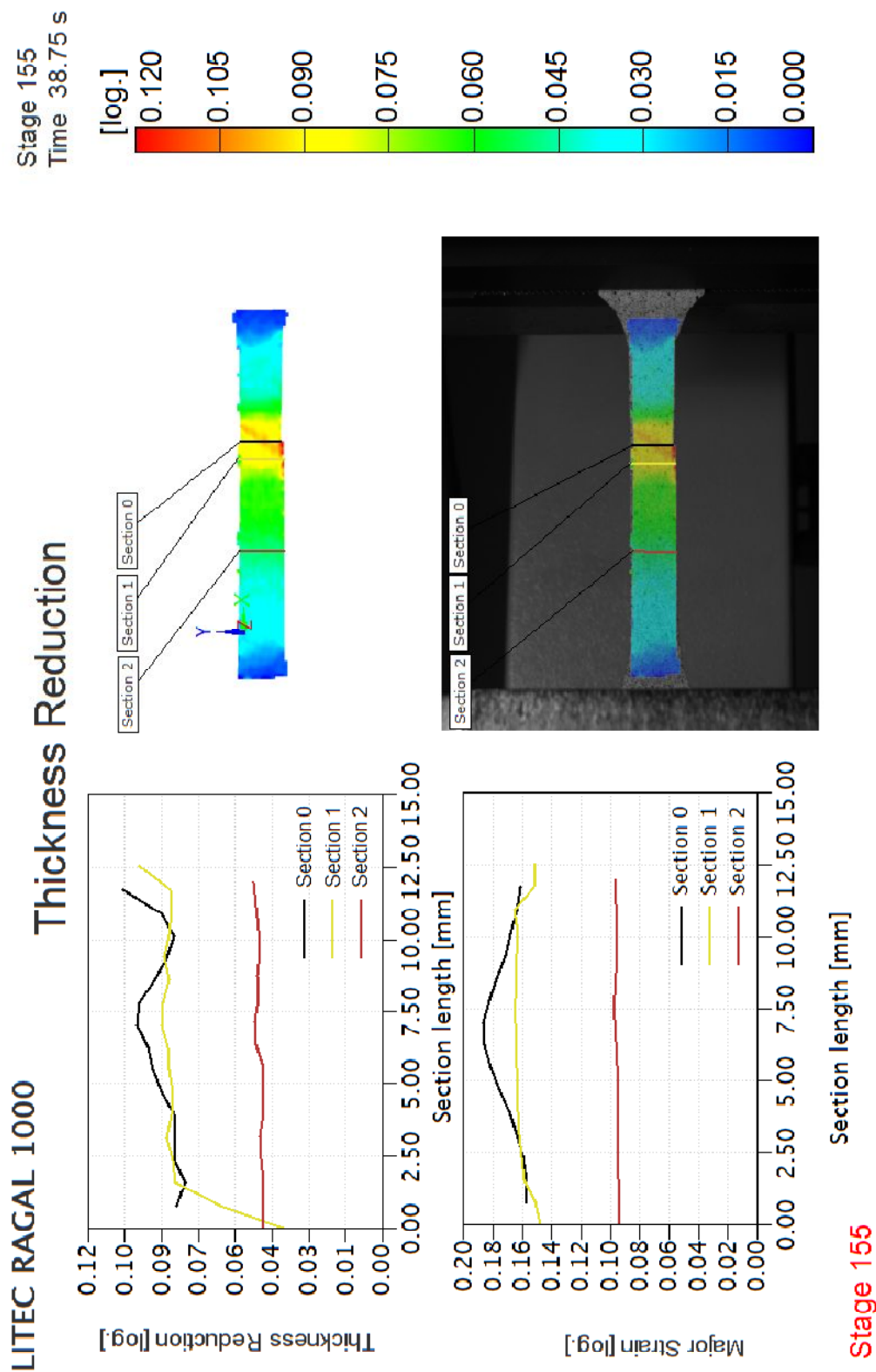
**ARAMIS**

**gom**  
www.gom.com









## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji – li diplomovou práci nebo poskytnu – li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 27. května 2011

Podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with head of the thesis and a consultant.

Date: 27. May 2011

Signature